



О. Ю. ЛАВРОВА, М. И. МИТЯГИНА, А. Г. КОСТЯНОЙ

СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА ЗОН ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

**МОСКВА
2016**

УДК 528.88; 551.465; 551.463.8; 551.463.6; 528.873.044.1; 629.78
Л13

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук С. А. Ермаков, д-р техн. наук Е. А. Лупян

Л13 *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. — М.: ИКИ РАН, 2016. — 334 с. : табл., ил., цв. ил.

ISBN 978-5-00015-004-7

Монография посвящена обзору работ по исследованию антропогенных и биогенных загрязнений в Балтийском, Чёрном и Каспийском морях на основе использования комплексной спутниковой информации. Представленные материалы базируются на результатах, полученных в ходе выполнения проекта Российского научного фонда (РНФ) № 14-17-00555 «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации», который выполнялся в 2014–2016 гг. Данные исследования проводились объединённой командой учёных из Института космических исследований РАН (Москва) и Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва). В монографии обсуждаются цели и задачи исследований, состояние проблемы, методы и средства, используемые для выполнения работ. Особое внимание уделено результатам, полученным в ходе выполнения проекта.

Монография адресована широкому кругу специалистов в области дистанционного зондирования океанов и морей из космоса, океанологии, экологии, защиты окружающей среды, а также преподавателям, аспирантам и студентам профильных высших учебных заведений. Книга будет интересна работникам нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей России. В книге приведено большое количество иллюстративного материала и обширный список литературы, посвящённой различным аспектам дистанционного зондирования Земли из космоса.

O. Yu. Lavrova, M. I. Mityagina, A. G. Kostianoy

Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk

The monograph is devoted to a review of studies of anthropogenic and biogenic pollution in the Baltic, Black and Caspian Seas based on the use of integrated satellite information. The material presented in the book is based on the results obtained during the execution of the project of the Russian Science Foundation (RNF) No. 14-17-00555 “Research of influence of dynamic and circulation processes on the distribution of biogenic and anthropogenic pollution of the sea surface based on the integrated use of satellite data” which was carried out in 2014–2016. These studies were performed by a team of scientists from the Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (Moscow), and P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS (Moscow). The book discusses the purpose and objectives of the research, state of the problem, methods and tools used to perform the work. Particular attention is paid to the results obtained in the course of the project.

The book is addressed to a wide range of experts in the field of remote sensing of the oceans and seas from space, oceanography, ecology, environmental protection, as well as professors, graduate students and students of higher educational institutions. The book will be interesting to oil and gas industry professionals who are engaged in the development of offshore oil and gas deposits, assessment of the impact on the environment, ecological monitoring during the design, construction and operation of ports, terminals, oil/gas platforms and pipelines at the shelves of the Russian seas. The book contains a lot of illustrations and an extensive list of references on various aspects of remote sensing of Earth from space.

Компьютерная верстка: *Комарова Н. Ю.*

Дизайн обложки: *Захаров А. Н.*

ISBN 978-5-00015-004-7

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Основные источники загрязнений морской среды.....	19
1.1. Нефтяные загрязнения.....	20
1.1.1. Балтийское море	20
1.1.2. Чёрное и Азовское моря	31
1.1.3. Каспийское море	35
1.2. Взвешенное вещество.....	41
1.3. Цветение вод.....	45
Глава 2. Средства и методы работы с данными спутникового дистанционного зондирования.....	50
2.1. Используемые спутниковые данные	50
2.1.1. Искусственные спутники Земли ERS-1, -2	53
2.1.2. Искусственный спутник Земли Envisat.....	56
2.1.3. Искусственные спутники Земли Radarsat-1, -2	59
2.1.4. Искусственные спутники Земли TerraSAR-X, TanDEM-X.....	61
2.1.5. Искусственные спутники Земли серии Sentinel.....	63
2.1.6. Искусственные спутники Земли серии Landsat	71
2.1.7. Искусственные спутники Земли Terra и Aqua	73
2.1.8. Гиперспектрометры спутникового базирования	77
2.2. Информационные ресурсы и архивы спутниковых данных	79
2.3. Спутниковый информационный сервис “See The Sea”	83
2.4. Идентификация нефтесодержащих судовых сбросов на спутниковых радиолокационных изображениях.....	92
2.5. Совместный анализ спутниковых радиолокационных и оптических данных.....	97
Глава 3. Балтийское море.....	101
3.1. Физико-географические характеристики Балтийского моря	101
3.2. Нефтяное загрязнение	107
3.2.1. Юго-Восточная Балтика	107
3.2.2. Финский залив	116
3.3. Прогноз распространения и оценка рисков нефтяного загрязнения	122
3.3.1. Модель Seatrack Web SMHI	122
3.3.2. Юго-Восточная Балтика	124
3.3.3. Финский залив	136
3.4. Интенсивное цветение водорослей.....	142
3.4.1. Особенности цветения водорослей в Балтийском море.....	142
3.4.2. Мониторинг интенсивного цветения воды сканерами цвета	145

3.4.3. Выявление областей интенсивного цветения водорослей по данным спутниковой радиолокации	151
3.5. Выток вод Вислы в Гданьский залив	162
3.5.1. Гидрологические особенности Гданьского залива	162
3.5.2. Спутниковые методы изучения речных плюмов	164
3.5.3. Мониторинг распространения вытока Вислы после аномального паводка ...	168
3.6. Вынос вод Калининградского залива в Гданьский залив	172
3.7. Повышенное содержание взвешенного вещества в Финском заливе	189
3.7.1. Морской газопровод "Nord Stream"	189
3.7.2. Порт Усть-Луга	201
3.7.3. ММПК «Бронка»	205
3.8. Зоны экологического риска в Балтийском море	211
Глава 4. Чёрное море	214
4.1. Физико-географические характеристики Чёрного моря	214
4.2. Нефтяные загрязнения	222
4.2.1. Нефтяные загрязнения в результате судовых сбросов	223
4.2.2. Нефтяные загрязнения в результате естественных выходов углеводородов с морского дна	235
4.3. Распространение взвешенного вещества, выносимого реками в восточную часть Чёрного моря	247
4.4. Подспутниковые эксперименты в северо-восточной части Чёрного моря	256
4.4.1. Методика проведения подспутниковых измерений	256
4.4.2. Задачи подспутниковых экспериментов	260
4.4.3. Исследование влияния прибрежных течений на распространение антропогенных загрязнений	263
4.5. Зоны экологического риска в Чёрном море	268
Глава 5. Каспийское море	271
5.1. Физико-географические характеристики Каспийского моря	271
5.2. Нефтяное загрязнение морской поверхности в районе нефтедобычи Нефтяные Камни	278
5.3. Загрязнение морской поверхности Южного Каспия, обусловленное грязевым вулканизмом на морском дне	290
5.4. Риски нефтяного загрязнения Каспия в результате добычи и транспортировки углеводородов	294
5.5. Экологические проблемы залива Кара-Богаз-Гол	301
5.6. Зоны экологического риска в Каспийском море	306
Заключение	309
Список литературы	312
Список сокращений	330

ВВЕДЕНИЕ

Монография посвящена обзору работ по исследованию антропогенных и биогенных загрязнений в Балтийском, Чёрном и Каспийском морях на основе использования комплексной спутниковой информации. Эти исследования проводятся объединённой командой учёных из Института космических исследований РАН (Москва), Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва) и Морского гидрофизического института РАН (Севастополь). Материалы, представленные в монографии, базируются на результатах, полученных в ходе выполнения проекта Российского научного фонда (РНФ) № 14-17-00555 «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации», который выполнялся в 2014–2016 гг. В монографии обсуждаются цели и задачи исследований, состояние проблемы, методы и средства, используемые для выполнения работ. Особое внимание уделено результатам, полученным в ходе выполнения проекта.

Экологическое состояние морей, омывающих Россию, вызывает обоснованную озабоченность специалистов. Это обусловлено многими причинами: увеличением нефтяного загрязнения вследствие расширения деятельности нефтегазовой отрасли и интенсивности судоходства; повышением концентрации взвешенного вещества в воде, что приводит к увеличению мутности вод и снижению биопродуктивности; аномальным цветением вод, которое с каждым годом охватывает всё большие площади, становится более продолжительным и возникает в тех районах, где ранее не наблюдалось. На современном этапе исследование Мирового океана невозможно без использования информации, получаемой с помощью приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли. В последнее время во всем мире запущено большое количество спутников с научной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра. Точность и разрешающая способность этих приборов постоянно растёт, расширяется и набор параметров, характеризующих состояние океанов и морей, которые могут быть измерены из космоса.

Целью проекта РНФ являлась разработка методов восстановления параметров загрязнения морской поверхности, исследование влияния на их распространение динамических и циркуляционных процессов и определение экологического состояния акваторий Балтийского, Чёрного и Каспийского морей на основе комплексного анализа спутниковой информации.

Цель проекта согласуется с приоритетными направлениями развития науки и техники в области прорывных технологий для экологии и рационального природопользования, а его результаты внесут свой вклад в создание технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения. Спутниковый экологический мониторинг морской поверхности включает в себя не только выявление нефтяных, антропогенных и биогенных загрязнений, но и прогноз их распространения. Причём прогноз распространения загрязнений возможен только на основе детального знания всей совокупности гидродинамических процессов, характерных для района мониторинга.

Как показывает наш многолетний опыт спутниковых наблюдений различных районов Мирового океана и морей России [Лаврова, Митягина, 2012; Лаврова и др., 2011а; Митягина и др., 2015], задачи выявления загрязнения морской среды и исследования динамических процессов, происходящих в этой среде, необходимо решать в тесной взаимосвязи, поскольку попадая в морскую среду, загрязнения становятся частью этой среды и развиваются по тем же законам, по которым развивается и сама морская среда. Разнообразие условий в реальном океане, влияние огромного числа факторов как атмосферного, так и внутриокеанического происхождения, при большой сложности и стоимости натурных измерений создают определённую фрагментарность описания реальных процессов, происходящих в конкретных акваториях. Для решения многих практических задач необходимы более детальные сведения о фактическом пространственно-временном распределении мезо- и субмезомасштабных процессов (вихрей, вихревых диполей, струй, внутренних волн и фронтов) в различных районах, приближенные к реальному времени.

Сложные структуры течений, сопутствующие этим явлениям, проявляются на морской поверхности и могут быть зафиксированы из космоса современными средствами дистанционного зондирования. Все вышеперечисленные факты подтверждают научную значимость решения проблемы, поставленной в данном проекте, который направлен на развитие методов выявления и распознавания антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности и исследование динамических и циркуляционных процессов в морях, влияющих на их распространение, на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования из космоса.

Разработка научных основ и методологии количественной оценки экологического состояния морских акваторий и решение задачи определения параметров загрязнения и динамических характеристик водной среды на основе комплексного анализа спутниковой информации как во внутренних (Балтийское, Чёрное и Каспийское), так и в окраинных морях (Баренцево, Карское) России является на сегодняшний день крайне актуальной. Эти моря наиболее подвержены нефтяному загрязнению из-за широкомасштабного освоения запасов нефти и газа на морском шельфе, сопровождаемого строительством и эксплуатацией морских стационарных платформ, береговых терминалов, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, сейсмическими и буровыми работами, ростом судоходства и пр.

В первую очередь речь идёт о нефтяном загрязнении морской поверхности, а также о содержании взвешенного вещества и биогенных органических примесей, связанных как с процессом фотосинтеза в фитопланктоне, так и с антропогенно-спровоцированным повышением биологической продуктивности водорослей. На основе данных спутникового дистанционного зондирования в различных диапазонах спектра получены интегральные оценки экологического состояния исследуемых акваторий. Существенная часть исследований в рамках проекта была направлена на изучение влияния динамических и циркуляционных процессов и природных факторов (меандрирование течений, вихревая активность, колебания уровня, сгонно-нагонные явления и апвеллинг, температурный и ветровой режимы, осадки, сток рек) на изменчивость пространственно-временных распределений и интенсивность загрязнений морской среды, проявляющихся на спутниковых изображениях.

Важное место в проекте было отведено усовершенствованию методик и развитию инструментария для определения типов и масштабов загрязнений, а также для получения их количественных оценок. Отдельное внимание уделяется усовершенствованию алгоритмов распознавания проявлений загрязнений морской среды различного происхождения по данным дистанционного зондирования.

Проект был сфокусирован на следующих задачах:

- 1) установление нефтяных загрязнений морской поверхности (как обусловленных антропогенными факторами, так и связанные с естественными выходами углеводородов на морскую поверхность);
- 2) определение ареалов распространения взвешенного вещества и зон активного цветения водорослей, выявленных на основе анализа спутниковых данных за последние 10 лет;
- 3) получение статистически достоверной информации о сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости различных типов загрязнений;
- 4) выделение и изучение элементов циркуляции вод, осуществляющих перенос загрязнений и способствующих очищению от них водной среды;
- 5) установление закономерностей динамики распределения загрязнений;
- 6) определение зон экологического риска;
- 7) определение особенностей трансграничного переноса загрязнений в районах морских границ с сопредельными государствами.

Поставленные в проекте задачи решались для акваторий Балтийского, Чёрного и Каспийского морей, что определяется, в первую очередь, большим банком данных дистанционного зондирования и измерений *in-situ*, накопленных для этих районов исполнителями проекта в ходе многолетнего спутникового мониторинга [Лаврова и др., 2011а, 2015, Mityagina, Lavrova, 2016]. В то же время, эти моря существенно различаются по своим характеристикам и по термогидродинамическим процессам, происходящим в них, что способствует выработке обобщённого подхода, допускающего возможность применения развитых в ходе исполнения проекта методик к различным акваториям Мирового океана. В частности, разработанные методики в первую очередь будут распространены на акватории Баренцева и Карского морей, эта задача отличается высокой актуальностью в связи с интенсивным освоением Арктики, прежде всего, с развитием добычи углеводородов на Арктическом шельфе и интенсификацией судоходства в данном районе Мирового океана.

Результаты проведённой научно-исследовательской работы могут быть использованы для решения одной из важнейших задач океанологии — исследования гидродинамических процессов (особенно в субмезомасштабном диапазоне), для развития методик спутникового мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности с учётом локальных гидродинамических процессов. Кроме того, результаты могут быть востребованы в различных проектах, выполняемых в рамках системы Министерства природных ресурсов, Росгидромета и МЧС РФ, и будут полезны для специалистов нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей.

Первым параметром загрязнения, на оценку которого в течение длительного времени было направлено внимание исследователей, являлось загрязнение морской поверхности нефтесодержащими плёнками [Crocker et al., 2007; Lu, 2003; Torouzelis et al., 2006; Redondo et al., 2008; Shi et al., 2008]. Развитые учёными методы и технологии начали применяться на практике [Лаврова и др., 2011a; Kostianoy, Lavrova, 2014; Oil pollution..., 2016, 2017a, b]. Так, например, в Балтийском море HELCOM (Helsinki Commission) проводит мониторинг и ежегодно публикует сводные карты распределения нефтяных пятен, но только тех, которые были обнаружены авиационным путём, а это всего несколько десятков в год [Kostianoy, Lavrova, 2014]. Значительно больше нефтяных пятен обнаруживается с помощью спутниковых методов, например, в рамках проекта CleanSeaNet, осуществляемого Европейским агентством морской безопасности (European Maritime Safety Agency — EMSA), публикующим сводные карты судовых разливов. Существенным недостатком является то, что в основу составляемых EMSA карт положены алгоритмы автоматического распознавания нефтяных загрязнений на морской поверхности, причём исключительно на основе РЛ-данных, что значительным образом завышает вероятность ложной тревоги [Kostianoy, Lavrova, 2014; Oil pollution..., 2016, 2017a, b].

Задача детектирования нефтяных пятен на основе радиолокационных изображений морской поверхности до сих пор остаётся нерешённой. Существует ряд объективных причин, затрудняющих интерпретацию спутниковых радиолокационных изображений и уверенное выделение на них нефтяных загрязнений, поскольку такие пятна, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от проявлений других явлений и объектов, которые принято называть «РЛ-подобиями» пятен. Среди РЛ-подобий нефтяных пятен можно назвать органические плёнки, некоторые типы льда, области, затенённые сушей, дождевые ячейки, зоны апвеллинга, внутренние волны в атмосфере и океане и т. п. По собственным оценкам EMSA, уровень ложной тревоги в прибрежной зоне достигает 60 %. Кроме того, эти карты не составляются для восточных частей Чёрного и Балтийского морей, и совсем не составляются для Каспийского моря.

Данный проект РНФ ставил своей целью оценку нефтяного загрязнения морской поверхности на основе мультисенсорного подхода, т. е. на основе совместного использования разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности, что существенно повышает достоверность интерпретации спутниковых данных. Применяемые нами методы позволяют не только картировать, но и проводить оценку уровня загрязнённости той или иной акватории.

В Балтийском море ежегодно в июле-августе огромное пространство вод охвачено цветением цианобактерий. Эти цветения воды вызываются в основном двумя видами цианобактерий: *Nodularia spumigena* и *Aphanizomenon flosaquae*. В работе [Reinart, Kutser, 2006] показано, что поскольку скопления цианобактерий находятся либо на поверхности воды, либо в её непосредственной близости, это обуславливает повышенные значения нормализованной яркости восходящего излучения по сравнению с водами, свободными от цианобактерий. Анализ временной изменчивости интенсивности цветения цианобактерий в Балтийском море на основе данных сенсоров CZCS (1979–1984), SeaWiFS и MODIS (1998–2006) был проведён в работе [Kahru et al., 2007]. На основе анализа указанного массива данных в этой работе помимо построения ежегодных кумулятивных карт для каждого пикселя области цветения размером 1×1 км была рассчитана частота цветения цианобактерий. В 2002 г. Шведский метеорологический и гидрологический институт разработал систему мониторинга цветения цианобактерий в Балтийском море “Baltic Algae Watch System”, основанную на обработке данных AVHRR [Hansson, Nakansson, 2007]. В результате проведённых для периода 1997–2009 гг. исследований были получены карты числа дней с цветением цианобактерий, карты областей цветения и рассчитана интенсивность цветения.

Взвешенное вещество входит практически во все существующие в настоящее время классификации качества вод, так как является одним из основных элементов в круговороте вещества в природных водоёмах. Роль взвесей в водоёмах весьма значительна. В частности, следует отметить, что Балтийское море относительно мелководное, поэтому большое количество взвешенного вещества образуется в результате вертикального перемешивания (взмучивания) при сильном волнении на мелководье. Прозрачность балтийских вод постоянно падает. Так, например, в Северной Балтике она снизилась с 9 м в 1914–1939 гг. до 6 м в настоящее время [Hopkins, 2000]. Эта же тенденция наблюдается в Южной Балтике и в ряде прибрежных зон. В настоящее время определение взвешенного вещества и цветения вод Балтийского моря проводится прилегающими странами и международными организациями, но недостаточно регулярно и по ограниченным акваториям. Карты пространственного распределения мутности и цветения вод регулярно делаются Финским институтом окружающей среды (SYKE).

Картированием распределения взвешенного вещества и цветения вод в Чёрном море по отдельным спутниковым изображениям занимается Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН и Морской гидрофизический институт РАН. Картирование нефтяных загрязнений Чёрного моря проводится НИЦ «Планета» (в российском секторе), авторами проекта (вся акватория) и российскими частными компаниями (ИТЦ «СКАНЭКС» и др.) (например, акватория Новороссийского порта).

В Каспийском море ни одна из прикаспийских стран (за исключением России) не проводит комплексного спутникового мониторинга акватории моря, поэтому комплексное картирование нефтяного загрязнения, распределения взвешенного вещества и цветения вод проводится только авторами проекта, но пока по серии отдельных спутниковых изображений за ограниченные периоды времени [Лаврова и др., 2011a, Kostianoy et al., 2011, 2014a; Mityagina, Lavrova, 2016].

Таким образом, на сегодняшний момент можно говорить о фрагментарности и разрозненности существующих наборов карт параметров загрязнения, совмещённых с динамическими характеристиками водной среды. Поэтому предложенное

в проекте сводное картирование нефтяного загрязнения, взвешенного вещества и цветения вод, а также выявление естественных и антропогенных источников этих загрязнений представляет собой задачу, которая еще не была выполнена для Балтийского, Чёрного и Каспийского морей, но чрезвычайно актуальна в настоящее время. Кроме того, большим преимуществом данного проекта РФ является то, что изменчивость исследуемых параметров рассмотрена на длительном (десятилетнем) временном интервале, позволяющем выявить основные тренды, которые могут быть позднее положены в основу прогностических моделей.

Исследованию гидродинамических процессов в океане на основе данных дистанционного зондирования уделяется большое внимание во всем мире. Бурное развитие этих исследований в течение последних лет было в значительной степени стимулировано совершенствованием методов спутникового дистанционного зондирования океана в ИК- и видимом диапазонах электромагнитного спектра и доступностью этих данных [Kostianou et al., 2017; Lavrova et al., 2016b]. Несмотря на усиленное внимание к исследованию гидродинамических процессов, наиболее изученными и описанными остаются мезомасштабные процессы, в первую очередь вихри и гидрологические фронты с характерными масштабами 30–100 км, поскольку пространственное разрешение спутниковых сенсоров оптического и ИК-диапазонов, на данных которых базировались исследования, составляет 250–1000 м. В связи с появлением данных OLI/TIRS Landsat-8 и MSI Sentinel-2, позволяющих получать данные с высоким пространственным разрешением, ситуация существенно улучшилась.

Субмезомасштабные вихревые структуры, мелкомасштабные фронты, струи с характерными масштабами от сотен метров до первых десятков километров изучены значительно слабее. Среди работ зарубежных учёных следует отметить работы, в которых изучались мелкомасштабные вихревые структуры в Средиземном море, у берегов Калифорнии, Норвегии и в других районах Мирового океана [DiGiacomo, Holt, 2001; Eldevik, Dysthe, 2002; Johannessen et al., 1994; Marmorino et al., 2010; Munk et al., 2000; Scully-Power, 1986; Stevenson, 1989, 1998]. Ряд приоритетных спутниковых исследований мезомасштабных и субмезомасштабных фронтов и вихрей в Чёрном и Каспийском морях был проведён коллективом участников проекта из Института космических исследований РАН, Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и Морского гидрофизического института РАН. Результаты отражены в многочисленных публикациях в отечественных и зарубежных изданиях, а также в трудах международных конференций (например, [Гинзбург и др., 2000; Костяной и др., 2010; Лаврова и др., 2015; Митягина, Лаврова, 2009; Ivanov, Ginzburg, 2002; Lavrova et al., 2010; Mityagina et al., 2010]).

Использование данных спутникового дистанционного зондирования морской поверхности существенно расширило представления о таком важном явлении, как внутренние волны в океане. Дистанционным наблюдениям распространения внутренних волн в Мировом океане посвящены сотни публикаций, при этом их поток не обнаруживает тенденцию к уменьшению [Alpers, 1985; Apel et al., 1975; da Silva, Helfrich, 2008; da Silva et al., 2011; Hsu et al., 2000; Zeng, Alpers, 2004]. Несмотря на усиленное внимание к исследованию внутренних волн, наиболее изученными экспериментально и описанными теоретически остаются внутренние гравитационные волны в прибрежных акваториях океанов и приливных морей, возникающие при взаимодействии приливных течений с кромкой шельфа. Подавляющая часть экспе-

риментальных данных о внутренних волнах неприливной природы получена с помощью контактных методов. Существует ряд работ, посвящённых натурным наблюдениям и численному моделированию процессов генерации и распространения короткопериодных внутренних волн в морях без приливов, основанных на данных контактных измерений (например, [Иванов, Лисиченок, 2002; Иванов, Серебряный, 1985; Коняев, 1975; Лисиченок, 2005]). Публикации, посвящённые дистанционным наблюдениям поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов, практически отсутствуют. Участникам проекта принадлежит также приоритет в изучении внутренних волн в Чёрном, Балтийском и Каспийском морях на основе спутниковых радиолокационных данных. В частности, нами был открыт неизвестный ранее механизм генерации внутренних волн в морях без приливов движущимися холодными вихрями [Лаврова и др., 2011б].

До сих пор нерешёнными остаются вопросы, касающиеся механизмов возникновения мелкомасштабных (субмезомасштабных) гидродинамических процессов и явлений, районов их проявления, продолжительности существования, их тонкой пространственной структуры, связи с мезомасштабными процессами. Накопление регулярной спутниковой информации, получаемой с высоким разрешением, в разные периоды и в разных районах, на наш взгляд будет способствовать решению поставленных проблем. Также нерешённой остаётся проблема восстановления полей течений по спутниковым изображениям. Относительно неплохие результаты пока достигнуты при восстановлении глобальных полей течений (см., например, [Chargon et al., 2005]). Однако задача восстановления локальных субмезомасштабных течений, являющаяся чрезвычайно важной для прогноза дрейфа нефтяных загрязнений, тоже до сих пор не решена. Использование радиолокационных изображений высокого пространственного разрешения и применение к ним нового алгоритма восстановления течений [Seppke et al., 2010a, b] позволит значительно продвинуться в этом направлении.

Наиболее глубокие и всесторонние экспериментальные исследования механизмов подавления волн плёнками различного происхождения и соответствующей перестройкой спектра поверхностного волнения, а также зависимости модуляции радиолокационных сигналов от наличия плёнок различного происхождения на морской поверхности проводятся в Институте прикладной физики РАН (ИПФ РАН, Нижний Новгород) (см., например, [Ермаков и др., 1982, 1985; Ermakov et al., 2000]).

Мониторинг нефтяных и антропогенных загрязнений кроме непосредственной идентификации загрязнений, как правило, осуществляемой при помощи данных радаров с синтезированной апертурой (SAR, ASAR), требует получения ряда дополнительной информации о ветре, характеристиках волнения, температуре воды и воздуха, ледовом покрове, цветении вод, структуре поверхностных мезомасштабных и субмезомасштабных течений и явлений для описания проявления, трансформации нефтяных плёнок и их распространения. В принятой ныне мировой практике при составлении прогноза распространения нефтяного загрязнения на морской поверхности в модель закладываются ветер, волнение и постоянные течения с пространственным разрешением порядка 1 км. Наш опыт многолетнего спутникового мониторинга [Лаврова и др., 2011а] показывает, что помимо этого необходимо учитывать и фактическую мезомасштабную и субмезомасштабную циркуляцию вод, которая имеет огромное влияние на перенос загрязнений.

Основным методом решения поставленных в проекте задач являлся метод дистанционного зондирования водной поверхности. В общем случае, метод основан на использовании цифровых данных радиолокаторов, спектрорадиометров, альтиметров, скаттерометров, установленных на зарубежных и российских спутниках и позволяющих получать информацию о поле температуры поверхности моря, взвеси, концентрации хлорофилла, других оптических характеристиках водной поверхности, нефтяном загрязнении, а также об аномалиях уровня моря, ледовом покрытии, изменчивости течений, скорости ветра и высоты волн с высоким пространственным и временным разрешением.

Задача обнаружения и прогнозирования распространения загрязнений различной природы решалась в проекте РНФ на основе совместного использования разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности (мультисенсорный и мультиплатформный подход). Наиболее важным моментом является разработка методологии комплексного использования данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК-данные), пространственному разрешению и размерности.

Экспериментальную основу проекта РНФ составляет архив данных, имеющихся в распоряжении участников проекта. К настоящему моменту уже получено более двадцати тысяч радиолокационных изображений морской поверхности районов интереса и более двадцати пяти тысяч оптических и ИК-изображений. Архив постоянно пополняется в ходе выполнения национальных, международных и коммерческих проектов. Большой объём экспериментального материала гарантировал получение статистически достоверных результатов.

Исследования гидродинамических процессов на основе спутниковых изображений высокого разрешения, полученных в разных диапазонах электромагнитного спектра, включали в себя:

- усвоение и дальнейшее развитие методик выявления механизмов формирования и эволюции мезо- и субмезомасштабных вихрей, вихревых диполей, струй, фронтов и внутренних волн во внутренних морях;
- совместный анализ всей совокупности данных дистанционного зондирования для получения количественных оценок атмосферных и океанических процессов и явлений;
- усовершенствование методик восстановления с высокой пространственно-временной точностью основных гидродинамических параметров вихревых и волновых структур на основе совместного анализа данных спутниковой радиолокации и синхронных подспутниковых измерений.

Для оценки экологического состояния изучаемых акваторий была использована разработанная авторами проекта методика комплексирования разнородных данных спутникового дистанционного зондирования морской поверхности. Ниже перечислены типы спутниковых данных, обеспечивающие решение задач обнаружения и прогнозирования распространения загрязнений различной природы.

1. Выявление и распознавание различных типов антропогенных и биогенных загрязнений (ASAR Envisat, SAR ERS-2, SAR-C Sentinel-1A, -1B, сен-

- соры спутников серии Landsat, MSI Sentinel-2, гиперспектральные сенсоры Hyperion и HICO).
2. Выявление зон пространственной локализации поверхностных загрязнений пленками углеводородов (ASAR Envisat, SAR ERS-2, SAR-C Sentinel-1A, -1B, сенсоры спутников серии Landsat, MSI Sentinel-2).
 3. Выявление зон пространственной локализации поверхностных биогенных пленок (ASAR Envisat, SAR ERS-2, SAR-C Sentinel-1A, -1B, сенсоры спутников серии Landsat, MSI Sentinel-2).
 4. Определение зон интенсивного цветения фитопланктона (MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat MSI Sentinel-2, гиперспектральные сенсоры Hyperion и HICO).
 5. Выявление распространения речного стока в прибрежной зоне морей (ASAR Envisat, SAR ERS-2, SAR-C Sentinel-1A, -1B, оптические данные видимого диапазона MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat, MSI Sentinel-2, гиперспектральные сенсоры Hyperion и HICO).
 6. Детектирование явлений, проявляющихся на морской поверхности в поле цветности или температуры поверхности моря и влияющих на перенос взвеси и загрязнений, например, вихревые структуры, температурные фронты и апвеллинги (AVHRR NOAA, MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat, MSI Sentinel-2).
 7. Исследование оптических характеристик морских вод и ареалов распространения взвешенного вещества (MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat, MSI Sentinel-2, гиперспектральные сенсоры Hyperion и HICO).
 8. Восстановление реального поля скоростей (направление и скорость течений) с пространственным разрешением не ниже 250 м из совместного анализа последовательности спутниковых изображений в оптическом и инфракрасном диапазонах и радиолокационных данных (ASAR Envisat, SAR ERS-2, SAR-C Sentinel-1A, -1B, MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat, сенсоры спутников серии Landsat, MSI Sentinel-2).
 9. Восстановление полей температуры поверхности моря на основе изображений в инфракрасном диапазоне и использование их для анализа мезомасштабной динамики вод и процессов взаимодействия море-атмосфера (AVHRR NOAA, MODIS Aqua/Terra, TIRS Landsat-8).
 10. Восстановление полей приводного ветра (скорость и направления приводного ветра на высоте 10 м над морской поверхностью) по данным спутниковых скаттерометров.
 11. Анализ геострофических скоростей поверхностных течений для оценки и прогноза переноса загрязняющих веществ по акватории на основе спутниковой альтиметрии.

Кроме того, прогноз дрейфа и трансформации обнаруженных нефтяных загрязнений в Балтийском море выполнялся на основе интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского метеорологического и гидрологического института (SMHI). Эта же модель использовалась и для оценки рисков нефтяного загрязнения в «горячих» точках Балтийского моря, таких как нефтедобывающая платформа D-6 рос-

сийской нефтяной компании «Лукойл», подводный нефтепровод, соединяющий платформу D-6 с берегом, отдельные точки газопровода “Nord Stream”, различные участки судоходных трасс и якорных стоянок [Kostianou et al., 2014b].

Для Чёрного и Каспийского морей, в отдельных наиболее значительных случаях нефтяных загрязнений морской поверхности, выявленных на спутниковых изображениях, производились численные расчёты вероятности распространения нефтяного пятна (траектория движения) с помощью компьютерной модели FOTS (МГИ РАН, Севастополь).

Описанная выше методика позволяет выявить изменчивость и повторяемость анализируемых характеристик водной среды на различных временных интервалах (межгодовую, сезонную, месячную, декадную и даже, если понадобится, суточную) и на различных пространственных масштабах. На основе дальнейшего совместного анализа могут быть установлены причинно-следственные связи и пространственно-временные корреляции анализируемых процессов и явлений.

Поставленные в проекте РНФ задачи решались с использованием инструментария, интегрированного в геопортал “See The Sea”, созданный в ИКИ РАН и находящийся в опытной эксплуатации. Геопортал STS предназначен для изучения различных процессов и явлений, происходящих в океане и атмосфере над ним, на основе разнородных данных спутникового дистанционного зондирования. Программный сервис портала STS ориентирован на то, чтобы предоставить исследователю инструментарий, позволяющий визуально детектировать тот или иной процесс или явление, описать его, используя различную комплексную информацию, и сохранить эту информацию в специализированной базе данных для её дальнейшего анализа. В частности, при выделении нефтяных пятен на радиолокационных изображениях морской поверхности формируется описание конкретного пятна, которое включает в себя: координаты начала и конца сликовой полосы, связанной с нефтяным загрязнением, координаты центра пятна, совокупную длину сброса, общую площадь загрязнения, факт наличия судна — потенциального источника загрязнения и его координаты на момент съёмки.

Вся эта информация, занесённая в специализированную базу данных, используется для получения различного рода оценок, таких как количество зарегистрированных случаев нелегального сброса с судов загрязнённых вод, протяжённость сброса, площади загрязнений, примерная оценка объёмов (в данном районе, по всему морю, за определённый период и т.п.). Для определения объёмов нефтяных загрязнений по данным спутниковой радиолокации применяется косвенный подход, в котором по площади пятен на радиолокационном изображении оценивается объём разлива. Для решения этой задачи необходимо знать толщину плёнки. В ходе выполнения проекта начаты работы по разработке алгоритмов по определению толщины нефтяной плёнки на основе спутниковых данных оптического диапазона.

Пространственные характеристики формирования и распространения цветения воды восстанавливались по данным спутниковых спектрорадиометров (MODIS Aqua/Terra, MERIS Envisat). Методика детектирования областей интенсивного цветения фитопланктона основана на использовании различных комбинаций спектральных каналов видимого диапазона спектра. В частности, детектирование цветения (частично токсичных) сине-зелёных водорослей с помощью данных спектрорадиометров MODIS и MERIS основывается на применении данных зелёно-

го и красного каналов. Сигнал первого из них формируется в результате отражения взвешенными в воде частицами, в том числе подповерхностными скоплениями цианобактерий. Сигнал красного участка спектра в большей степени поглощается водой, поэтому его интенсивность определяется отражателями, расположенными в непосредственной близости от поверхности. Таким образом, комбинирование этих каналов делает возможным различение между поверхностными и подповерхностными скоплениями цианобактерий. Для сенсора MODIS этими двумя каналами являются 551 и 670 нм, для MERIS — 560 и 665 нм. Интегральная оценка биогенных загрязнений состоит, в первую очередь, в определении пространственной локализации биогенных плёнок (идентифицируемых по радиолокационным данным и данным видимого диапазона) и областей интенсивного цветения водорослей (выявляемых по цветосинтезированным изображениям видимого диапазона) и вычислении площади, занимаемой этими биологическими загрязнениями.

Определение концентраций взвешенного вещества по спутниковым данным и интегральная оценка взмученности вод осуществлялось по данным сенсоров MODIS и MERIS. В случае данных MODIS ареалы распространения взвешенного вещества определялись по цветосинтезированным изображениям, (комбинация оптических каналов 1-4-3 (RGB)). Отличительной характеристикой спектрометра MERIS является возможность рассчитывать концентрацию общего взвешенного вещества (TSM — Total Suspended Matter) в абсолютных единицах ($\text{г}/\text{м}^3$) и строить карты с пространственным разрешением 260 м. В рамках проекта РНФ строились и анализировались карты концентрации взвешенного вещества для тестовых районов (Финский залив Балтийского моря, в Чёрном море — акватория, прилегающая к дельте Дуная, и северо-восточная и восточная части моря), проводились оценки за разные промежутки времени и изучалась временная изменчивость взмученности вод.

Верификация спутниковой информации проводилась в ходе подспутниковых экспериментов в Балтийском и Чёрном морях. Было проведено шесть серий экспериментов в летне-осенний период 2014–2016 гг. с использованием современного океанографического оборудования.

В ходе исполнения проекта РНФ были получены следующие результаты.

1. Составлена представительная выборка радиолокационных, оптических и ИК-изображений, в том числе, квазисинхронных, для акваторий Балтийского, Чёрного, Каспийского, Баренцева, и Карского морей за период 2004–2016 гг. и получены на основе развитых в ИКИ РАН методик комплексного анализа спутниковых данных примеры различения нефтяных загрязнений и их радиолокационных подобий иной природы, в том числе областей цветения, по данным квазисинхронных наблюдений в различных спектральных диапазонах.
2. Развита и усовершенствована методика целевой обработки и анализа спутниковых изображений с целью выявления загрязнений морской поверхности различной природы, а также различения нефтяных и биогенных плёнок на морской поверхности.
3. Разработана методика оценки толщины нефтяной плёнки на основе гиперспектральных данных и данных сенсоров оптического диапазона высокого пространственного разрешения и проведена апробация для района нефтедобычи Нефтяные Камни в Каспийском море.

4. Восстановлена пространственно-временная структура и динамика мезо- и субмезомасштабных динамических процессов (вихрей, вихревых диполей, струй, внутренних волн и фронтов), характерных для конкретных акваторий Балтийского, Чёрного и Каспийского морей.
5. Установлена межгодовая и сезонная изменчивость, а также пространственное распределение вихревой и волновой активности в Балтийском, Чёрном и Каспийском морях.
6. Получены интегральные оценки нефтяных загрязнений в Балтийском, Чёрном и Каспийском морях за 2004–2016 гг. (количество зарегистрированных случаев, протяжённость сброса загрязнённых вод с судов, площади загрязнений, примерная оценка объёмов).
7. Произведено картографирование основных видов загрязнений для акваторий Балтийского, Чёрного и Каспийского морей и установлены закономерности динамики распределения загрязнений.
8. Получена статистически достоверная информация о влиянии вихревой и волновой динамики на распространение загрязнений и процесс самоочищения вод в тестовых акваториях.
9. Восстановлена картина сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости различных типов загрязнений на акваториях Балтийского, Чёрного и Каспийского морей.
10. Определены устойчивые зоны экологического риска, т. е. районы, наиболее подверженные нефтяным загрязнениям, «вредоносным» цветениям водорослей и повышенным концентрациям взвешенного вещества на акваториях Балтийского, Чёрного и Каспийского морей.
11. Выявлена межгодовая изменчивость уровня Балтийского, Чёрного и Каспийского морей, выделены временные интервалы подъёма или падения уровня моря и построены карты пространственной неоднородности скорости межгодовой изменчивости уровня.
12. Рассмотрена возможность применимости разработанных методик для оценки экологического состояния акваторий Баренцева и Карского морей и проведены первичные оценки их антропогенного загрязнения.

Результаты научно-исследовательской работы могут быть использованы:

- для решения одной из важнейших задач океанологии — исследования гидродинамических мезомасштабных и субмезомасштабных процессов в океанах и морях;
- развития методик спутникового мониторинга антропогенных, в частности, нефтяных загрязнений морской поверхности с учётом локальных гидродинамических процессов и метеорологических условий.

Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях, проводимых в учреждениях и организациях Российской академии наук и Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Полученные результаты могут быть также востребованы в различных проектах, выполняемых в рамках системы Министерства природных ресурсов, Росгидромета и МЧС РФ. Они могут

быть полезны для специалистов нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей, особенно в морях российской Арктики. Отдельные методики уже используются при производственно-экологическом мониторинге объектов обустройства нефтяного месторождения «Кравцовское» (нефтедобывающая платформа D-6 и подводный нефтепровод компании «Лукойл») в юго-восточной части Балтийского моря. Область применения отдельных решений, найденных в ходе реализации проекта, а также разработанных методик и алгоритмов, значительно шире, хотя и с трудом поддаётся экономическим расчётам.

Дистанционное зондирование Земли из космоса в последние годы претерпевает бурное развитие, что связано со следующими тремя факторами: во-первых, эта область космических технологий является второй, после космической связи, где предвидится существенный коммерческий потенциал; во-вторых, осознанная в последние годы проблема антропогенного влияния на Мировой океан требует создания глобальной сети мониторинга поверхности океана и приповерхностного слоя атмосферы, ключевым элементом которой являются космические средства наблюдения; и в третьих, разнообразная спутниковая информация о состоянии Мирового океана, атмосферы и суши является важнейшим источником данных для глобальных и региональных климатических исследований.

Значительные финансовые и технические ресурсы, требуемые для развития такой сети, диктуют необходимость широкой международной кооперации. Для того чтобы войти в эту кооперацию, причём не в качестве только потребителя услуг, необходимо опережающее развитие в России новых технологий и средств дистанционного зондирования Земли из космоса, что и является одним из основных аспектов выполненного проекта РНФ.

Благодарности. Данная монография подготовлена и издана в рамках и при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00555) «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации» (2014–2016).

Авторы выражают глубокую благодарность всем участникам проекта, которые выполняли отдельные задания в рамках задач, поставленных в проекте: С. А. Лебедеву (Геофизический центр РАН, ИКИ РАН), И. А. Уварову (ИКИ РАН), А. Я. Строчкову (ИКИ РАН), Т. Ю. Бочаровой (ИКИ РАН), Н. А. Калашниковой (ИКИ РАН), К. Р. Назировой (Географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, ИКИ РАН) и Е. В. Краюшкину (МГУ имени М. В. Ломоносова, ИКИ РАН).

Кроме того, авторы выражают глубокую признательность своим коллегам и постоянным соавторам: Д. М. Соловьеву и С. В. Станичному (МГИ РАН), А. И. Гинзбург и Н. А. Шеремету (ИО РАН им. П. П. Ширшова), Е. В. Булычевой и А. В. Креку (Атлантическое отделение ИО РАН им. П. П. Ширшова).

Особую благодарность авторы выражают сотрудникам отдела «Технологии спутникового мониторинга» ИКИ РАН, возглавляемого доктором технических наук

Е. А. Лупяном, за разработку и усовершенствование спутникового информационного сервиса “See The Sea”, без которого оперативная работа с огромным объёмом много-сенсорной информации была бы невозможна, а также Комаровой Н. Ю. (ИКИ РАН) за подготовку рукописи книги к печати.

Авторы выражают глубокую благодарность Европейскому космическому агентству за предоставление спутниковых изображений SAR ERS-1/2, ASAR Envisat, Sentinel-1A, -1B и Sentinel-2A.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ

К основным загрязняющим веществам водной среды (ЗВ) относятся нефтяные углеводороды (НУ) и нефтепродукты (НП), хлорорганические фосфорсодержащие соединения (ХОС), тяжёлые металлы (ТМ), техногенные радионуклиды, взвешенные вещества (ВВ) при больших концентрациях и химические отравляющие вещества (ХОВ) [Романкевич, Айбулатов, 2004]. Загрязнение морской среды является результатом загрязнения гидросферы, атмосферы, поверхностных частей литосферы и почв. Перенос ЗВ происходит не только в результате речного, подземного, плоскостного стока, но также в результате трансграничного атмосферного и водного переноса, течениями и льдом. Подавляющая часть ЗВ поступает в прибрежные воды, которые оказываются наиболее загрязнёнными.

Источниками поступления НУ и НП в море являются сточные воды, судоходство, добыча углеводородов в акваториях, буровые платформы, аварийные разливы, линзы углеводородов в толще грунта, нефтеперерабатывающие предприятия, дампинг. Они приводят к образованию нефтяной плёнки, загрязнению побережий, морских птиц, ухудшению промыслов рыбы, моллюсков и ракообразных, уменьшению влаго- и газообмена, провоцируют накопление металлов и токсичных органических соединений, увеличивают вторичное загрязнение [Романкевич, Айбулатов, 2004].

Взвешенные вещества поступают в результате производственной деятельности на акватории моря и на берегу — смыв, сброс, прокладка трубопроводов, кабелей, дампинг, взрывы на дне и пр. Большое количество ВВ поступает со стоком рек, в результате выноса вод из заливов и образуется в результате вертикального перемешивания при сильном волнении на мелководье. Они приводят к вторичному загрязнению, увеличению мутности, снижению фотоактивной радиации (ФАР), биопродуктивности, изменению структуры популяций, гибели бентоса [Романкевич, Айбулатов, 2004].

Эвтрофикация поверхностных вод, объясняемая главным образом излишком питательных веществ (фосфора и азота), является важной проблемой для многих внутренних морей, которая с каждым годом становится всё острее. В Балтийском море следствием эвтрофикации вод является бурное цветение сине-зелёных водорослей, которое с каждым годом охватывает всё большие площади [Hopkins, 2000].

Основные мировые разведанные запасы нефти сконцентрированы на Ближнем Востоке. Пять ближневосточных стран обладают почти 2/3 глобальных запасов: Саудовская Аравия (25 %), Ирак (11 %), ОАЭ (9 %), Кувейт (9 %) и Иран (9 %). Вне Ближнего Востока самые большие запасы имеют Венесуэла и Россия. Венесуэла

обладает приблизительно 7 %, Россия — почти 5 % глобальных запасов нефти. Россия производит 10 % нефти, в то время как потребляет только 4 %. В 1999 г. производство нефти в России составило примерно 300 млн т, в 2003 г. в России было добыто 421 млн т нефти, включая газовый конденсат, в 2005 г. — 460 млн т нефти. По итогам 2015 г. в России было добыто 534 млн т нефти и газового конденсата. При этом на долю «Роснефти» пришлось 189,2 млн т, «Лукойл» — 85,7 млн т, «Сургутнефтегаз» — 61,6 млн т, «Газпром нефти» — 34,3 млн т, «Татнефти» — 27,2 млн т, «Башнефти» — 19,9 млн т, «Славнефти» — 15,5 млн т, «РуссНефти» — 7,4 млн т. Остальными компаниями с российским капиталом и совместными предприятиями с иностранными инвестициями было добыто ещё 88,5 млн т.

Многие иностранные нефтяные корпорации также ведут свою деятельность на российском рынке. Главные зарубежные игроки в российском нефтяном бизнесе (в алфавитном порядке) — Agip, British Petroleum, British Gas, ChevronTexaco, Conoco, ExxonMobil, Neste Oy, Nirsk Hidro, McDermott, Mitsubishi, Mitsui, RD Shell, Statoil и TotalFinaElf.

Сырая нефть и нефтепродукты составляют примерно 40 % суммарного экспорта России, нефть — существенный источник доходов бюджета. Российская Федерация выступает как один из ведущих операторов в международном нефтяном бизнесе, являясь крупнейшим экспортёром нефти после Саудовской Аравии.

Рост перевалки нефти и других грузов через терминалы и порты морей России неизбежно приводит к увеличению числа танкеров и других типов судов, что приводит к росту «хронического» загрязнения морей и вероятности аварий судов, и, как следствие, к увеличению их загрязнения нефтепродуктами. В Мировом океане судоходство является причиной примерно 45 % нефтяного загрязнения океана. Судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону морей. Поэтому, прежде всего, представляется необходимым дать краткий обзор объектов и объёмов транспортировки (порты и терминалы) и разработки углеводородных ресурсов в исследуемых морях России.

1.1. НЕФТЯНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

1.1.1. Балтийское море

В *Финском заливе* основными действующими и проектируемыми российскими нефтяными терминалами являются (рис. 1.1): Приморск («Транснефть»), Высоцк («Лукойл»), Большой порт Санкт-Петербурга (Морской порт Санкт-Петербурга), Усть-Луга («Роснефть»), Батарейная (Сургутнефтегаз), Вистино (Северо-Западный альянс), Горки (ТНК-ВР) и Ломоносов [Hanninen, Rytkonen, 2004; Kuronen et al., 2008].

Приморск. Приморский нефтяной терминал является важнейшей составной частью и конечным пунктом Балтийской трубопроводной системы (БТС) компании ОАО «АК «Транснефть» (рис. 1.2). Данный проект ориентирован на транспортировку нефти с Тимано-Печорского месторождения, из Западной Сибири, Урало-Поволжья,

а также нефти стран СНГ на экспорт. Морской торговый порт Приморск является самым крупным портом по экспорту нефти и нефтепродуктов в Северо-Западном регионе России. Этот нефтяной терминал работает с декабря 2001 г. Максимальные возможности терминала оцениваются в 120 млн т, хотя в 2015 г. было отгружено всего 59,6 млн т нефти.



Р и с. 1.1. Нефтяные порты и терминалы Финского залива [MARIS, 2004]



Р и с. 1.2. Приморский нефтяной терминал (<http://www.unesco.org/csi/wise/unitwin.htm>)

От государственной границы России до порта Приморск в восточной части Финского залива действует региональная система безопасности мореплавания, включающая систему управления движением судов, которая ведёт непрерывный контроль их положения, соблюдения ими правил плавания на всей акватории региона.

Порт Приморск вполне обоснованно претендует на звание самого безопасного в России. За весь период эксплуатации аварийных ситуаций в порту не возникало. Одним из важных обязательных требований, предъявляемых к танкерам, заходящим в спецморнефтепорт, является чистота изолированного балласта в соответствии с требованиями российского законодательства. Контроль балласта каждого танкера осуществляет независимая аккредитованная экоаналитическая лаборатория. Проанализировав состояние танкеров всех стран, компания «Транснефть» в 2003 г. составила «чёрный список» судов, которые по соображениям безопасности не могут быть допущены в порт.

Важным подразделением порта являются очистные сооружения. Комплекс выполнен таким образом, что все сточные воды — промышленные, ливневые, дождевые и дренаж — проходят очистку и только потом попадают в Финский залив. Достижимые концентрации по очистке соответствуют требованиям водоёмов высшей рыбохозяйственной категории. Большую роль в сохранении вод Финского залива играет аттестованная экоаналитическая лаборатория, которая производит в порту постоянный мониторинг вод залива, атмосферного воздуха, почвы, а также проверку балластных вод танкеров, которые заходят под погрузку.

Балласт не разрешается сбрасывать, если превышена концентрация нефтепродуктов в балластных водах. В случае наличия загрязнённого сверх ПДК балласта танкер не догружается и срывает свой план погрузки, но вода в зоне ответственности порта остаётся чистой. Это вполне оправданные меры, так как объёмы сбрасываемого балласта составляют около 3,5 млн кубометров в год.

В порту разработан план ликвидации аварийных разливов нефти, который прошёл согласование во всех государственных структурах. Для ликвидации возможных аварий создана Аварийно-восстановительная служба — специально обученное, сертифицированное подразделение. При погрузке танкер находится в окружении бонов различного предназначения (см. рис. 1.2). Общее их количество в порту — 10 160 м. В Российской Федерации аналогичные средства борьбы с нефтеразливами применяются только в Новороссийском порту.

Высоцк. Открытое акционерное общество «Распределительный перевалочный комплекс — Высоцк «ЛУКОЙЛ-П» работает с июня 2004 г. (рис. 1.3). Экспортная мощность терминала в 2007 г. достигла 11,9 млн т нефтепродуктов (т. е. около 1/4 всего объёма продуктов «Лукойл» в РФ), в 2008 г. — 13,6 млн т, а по итогам 2015 г. было отгружено всего 11,8 млн т. С мая 2006 г. на нефтеналивном терминале в Высоцке осуществляется приём танкеров «река-море».

При строительстве терминала «РПК-Высоцк «ЛУКОЙЛ-П» были предприняты необходимые меры по охране окружающей среды, применялись самые совершенные технологии и оборудование, которые позволяют свести к нулю риск загрязнения воздуха, земли и воды. Несмотря на то, что по своему техническому оснащению и высочайшему уровню средств защиты окружающей среды терминал уже сегодня входит в число самых экологически защищённых портов мира, компания продол-

жает работу по усовершенствованию природоохранных мероприятий в зоне своей ответственности. Все танкеры, заходящие на терминал, должны иметь двойной корпус (борта и дно), изолированные системы для балластных вод и для груза, современное навигационное оборудование с электронными навигационными картами. РПК «ЛУКОЙЛ-П» принимает только суда, оборудованные системой возврата газов, которая позволяет улавливать испарения нефтепродуктов при загрузке танкеров. На терминале также предусмотрена лазерная швартовка судов, которая гарантирует идеальную точность всех перемещений в акватории терминала. Современное навигационное оборудование позволяет РПК войти в глобальную морскую систему спасения и бедствия (ГМССБ). Терминал оборудован современными системами для очистки сточных вод.



Р и с. 1.3. Распределительный перевалочный комплекс
Высоцк «ЛУКОЙЛ-П» (<http://www.rpk-vysotsk.ru/main/default.asp>)



Р и с. 1.4. Большой порт Санкт-Петербург (<http://dm-matveev.livejournal.com/570545.html>)

Большой порт Санкт-Петербург. Большой порт Санкт-Петербург (*официально* Федеральное государственное учреждение «Администрация морского порта Большой порт Санкт-Петербург») — государственное предприятие, обеспечивающее организацию торгового мореплавания в морском порту Санкт-Петербург и за его пределами в установленных зонах ответственности Российской Федерации (рис. 1.4).

Порт Санкт-Петербург расположен на островах дельты реки Невы, в Невской губе в восточной части Финского залива. Большой порт Санкт-Петербург включает причалы морского торгового, лесного, рыбного и речного портов, нефтяного терминала, судостроительных, судоремонтных и других заводов, морского пассажирского вокзала, речного пассажирского порта, а также причалы Кронштадта, Ломоносова, портовых пунктов Горская и Бронка. К ним ведёт разветвлённая система каналов и фарватеров.

Через Большой порт Санкт-Петербурга в 2007 г. было отгружено 14,4 млн т нефти, а в 2015 г. — всего 9,6 млн т нефтепродуктов; весь грузооборот порта составил 51,5 млн т грузов различных типов, хотя разрабатывались планы развития порта, позволяющие экспортировать до 60 млн т нефти в год. Кроме того, несколько миллионов тонн нефти ежегодно доставляются по Неве малыми танкерами и перегружаются на большие суда для экспорта.

Развитие центральных районов порта Санкт-Петербург ограничено плотной окружающей застройкой и занятостью береговой линии промышленными предприятиями. Низкая пропускная способность судоходных каналов не позволяет об-

рабатывать крупнотоннажные суда-контейнеры, а состояние железнодорожных и автомобильных подходов не соответствует потребностям в увеличении объёмов грузооборота. Только опережающее развитие аванпортов Большого порта Санкт-Петербург позволит развиваться Санкт-Петербургу как крупному транспортному центру. В соответствии с Генпланом города аванпорты запланированы к размещению в районе железнодорожной станции Бронка, в Кронштадте и Ломоносове. Согласно концепции, общая площадь территории аванпортов к 2025 г. должна составить 476,7 га, из которых 382,4 га предполагается «намыть». После ввода в эксплуатацию всех объектов и инфраструктуры петербургский порт сможет обрабатывать дополнительно 38,75 млн т, к 2020 г. — 40 млн т, а к 2025 г. — 70 млн т грузов.

Усть-Луга. В Лужской губе Финского залива был построен многоцелевой Морской торговый порт Усть-Луга пропускной способностью до 120 млн т различных грузов в год (рис. 1.5). Порт Усть-Луга расположен практически на границе РФ и Европейского союза. Он органично вписывается в транспортную сеть Северо-западного региона, который играет важную роль в организации транзитных перевозок грузов в рамках Европейской транспортной инфраструктуры. Большие глубины акватории порта (17 м) в сочетании с коротким подходным каналом (3,7 км) делают порт Усть-Луга единственным российским портом на Балтике, способным принимать сухогрузные суда дедвейтом до 75 тыс. т и наливные суда дедвейтом до 120 тыс. т. Круглогодичная эксплуатация с коротким периодом ледовой проводки (всего 40 дней) является несомненным конкурентным преимуществом порта Усть-Луга. Причём помощь ледокола понадобится лишь в самые сильные морозы. Немаловажным преимуществом нового порта является и то, что грузопотоки в порт идут в обход крайне перегруженного Санкт-Петербургского транспортного узла. За счёт резервных территорий порт Усть-Луга может развиваться на север Сойкинского полуострова.



Р и с. 1.5. Порт Усть-Луга (https://img-fotki.yandex.ru/get/3309/205480.1c6/0_cd36e_f247fe0f_orig)

Грузооборот порта Усть-Луга в 2013 г. составил 62,6 млн т, из них 39,7 — нефть и нефтепродукты, а в 2015 г. — 87,9 и 58,8 млн т, соответственно.

Все работы в порту ведутся в соответствии с согласованными проектами и действующим природоохранным законодательством. Для снижения воздействия на окружающую среду разработаны и согласованы мероприятия в части охраны воздуха, почвы, флоры и фауны, а также водных ресурсов региона. Ежегодно проводится локальный экологический мониторинг и производственный экологический контроль, результаты которого предоставляются в природоохранные организации.

В заключение отметим, что всего было девять проектов по строительству нефтяных терминалов в Финском заливе — Санкт-Петербург, Батарейная, Горки, Бронка, Логи, Высоцк, Приморск, Усть-Луга, Вистино.

На берегах Финского залива, в том числе, в непосредственной близости от российских границ находится более 15 нефтяных терминалов Финляндии и Эстонии (см. рис. 1.1), через которые также происходит перевалка нефти и нефтепродуктов. В этой связи возникают вопросы трансграничного переноса нефтяных загрязнений, которые требуют пристального внимания и организации комплексного мониторинга не только российской акватории Финского залива, но и акваторий сопредельных государств, что можно сделать только дистанционными спутниковыми методами. Ситуация осложняется тем, что среднее течение в заливе осуществляет перенос вод с запада на восток вдоль побережья Эстонии по направлению к российским берегам, затем поворачивает на север и вдоль побережья Финляндии выходит из Финского залива (рис. 1.6). Таким образом, загрязнения любого типа (включая нефтяные) могут попадать к нам с акватории Эстонии, с другой стороны, загрязнения с акватории России (включая те, что выносятся Невой) неизбежно будут попадать на акваторию Финляндии. Этот водообмен, включающий и нефтяное загрязнение, требует тщательного мониторинга в целях разграничения ответственности между государствами за возможное загрязнение водной среды и побережья Финского залива.

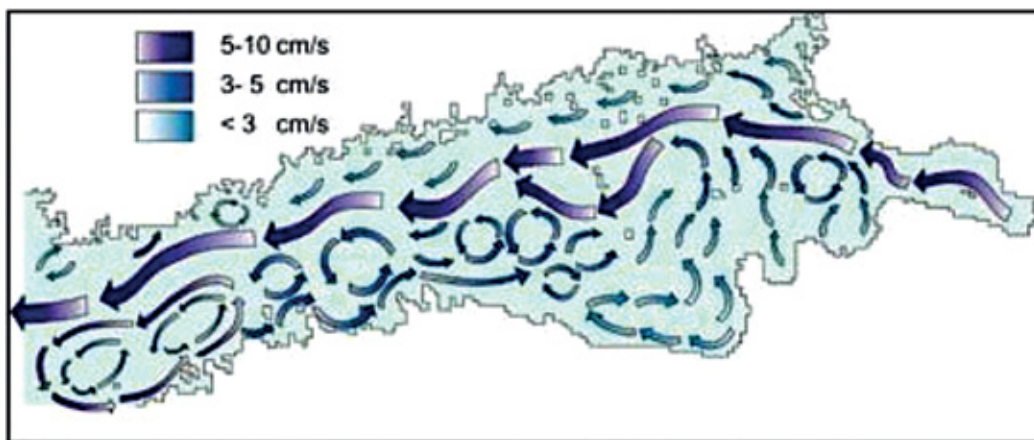
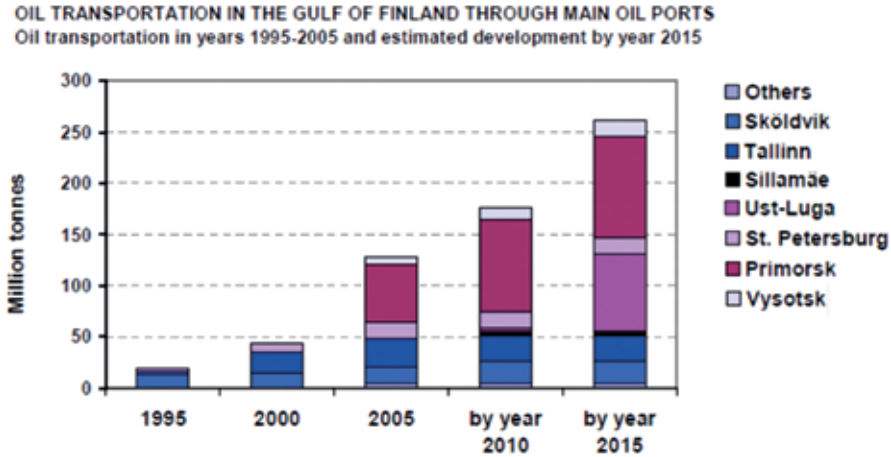


Рис. 1.6. Схема средних течений Финского залива по численной модели Финского института морских исследований (2004) (www.fimr.fi)



Р и с. 1.7. Объём транспортировки нефтепродуктов через Финский залив в 1995–2005 гг. и прогноз до 2015 г. Разными цветами обозначен соответствующий грузооборот через отдельные порты [Kuronen et al., 2008]

По оценкам Центра морских исследований Университета Турку (Финляндия) в 2007 г. 263 млн т грузов было транспортировано через Финский залив, среди которых доля нефтепродуктов составляет 56 % [Kuronen et al., 2008]. Через российские порты переваливалось 60 % грузов, финские — 23 % и эстонские — 17 %. Доля импорта составила 22 %, экспорта — 76 %, местных перевозок — 2 %. Через российские порты проходило 68,6 % всего грузооборота нефтепродуктов, эстонские — 17,2 % и финские — 14,2 %.

Наиболее крупными портами являются — Приморск (74,2 млн т), Санкт-Петербург (59,5 млн т), Таллинн (35,9 млн т), Сколдви́к (19,8 млн т), Высоцк (16,5 млн т) и Хельсинки (13,4 млн т). В 2007 г. в порты Финского залива было осуществлено около 53 600 заходов судов, при этом чаще всего суда заходили в Санкт-Петербург (14 651), Хельсинки (11 727) и Таллинн (10 614).

Прогнозы финского Центра морских исследований на 2015 г. согласно трём основным сценариям экономического развития России, Финляндии и Эстонии давали величину в 322,4–507,2 млн т грузов, которые будут транспортированы по Финскому заливу, что на 23–93 % больше, чем в 2007 г., причём при любом сценарии прирост грузооборота будет происходить главным образом за счёт России [Kuronen et al., 2008]. Кроме того, доля нефти и нефтепродуктов среди других грузов должна была ещё больше увеличиваться и в абсолютном выражении могла достигнуть 158–262 млн т (рис. 1.7). При этом для перевозки нефтепродуктов должно было быть задействовано от 6655 до 7779 танкеров. Однако, по результатам 2015 г., отгрузка нефти и нефтепродуктов из российских портов в Финском заливе составила всего 140 млн т.

Рост перевалки нефти и других грузов через терминалы и порты Балтики неизбежно приводит к увеличению числа танкеров и других типов судов, что приводит к росту «хронического» загрязнения моря и вероятности аварий судов, и, как следствие, к увеличению загрязнения Балтики (и, в частности, Финского залива) нефтепродуктами.

По статистике, в Мировом океане судоходство является причиной 45 % нефтяного загрязнения океана, в то время как добыча нефти на шельфе — только 2 %. Например, в Балтийском море ежедневно находится около 2000 больших кораблей и танкеров, поэтому, судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону Балтийского моря. Сброс нефти и нефтепродуктов с судов представляет собой значительную угрозу для морских экосистем.

В отчёте «Другая сторона нефтяных сликов» международной организации Осеана говорится, что, так называемое, «хроническое загрязнение» морских вод за счёт промывки танков и машинных отделений, слива льяльных вод и различного рода утечек нефтепродуктов в три раза превышает объём загрязнений в результате аварий танкеров [Осеана, 2003, 2004].

В Балтийском море объём нефтяного загрязнения оценивается в 2–5 тыс. т в год [Осеана, 2003, 2004]. По оценке Финского института окружающей среды [Finnish Environment Institute, 2004], общее ежегодное количество нефтяных пятен в Балтийском море, возникших в результате эксплуатации судов, составляет около десяти тысяч (или около 10 тыс. т нефтепродуктов). По сравнению с этими цифрами официальные данные HELCOM [HELCOM, 2016a] о ежегодном количестве обнаруженных и подтверждённых нефтяных пятен — 750 в 1988 г. и минимальное количество пятен — 82 в 2015 — кажутся явно заниженными (рис. 1.8).

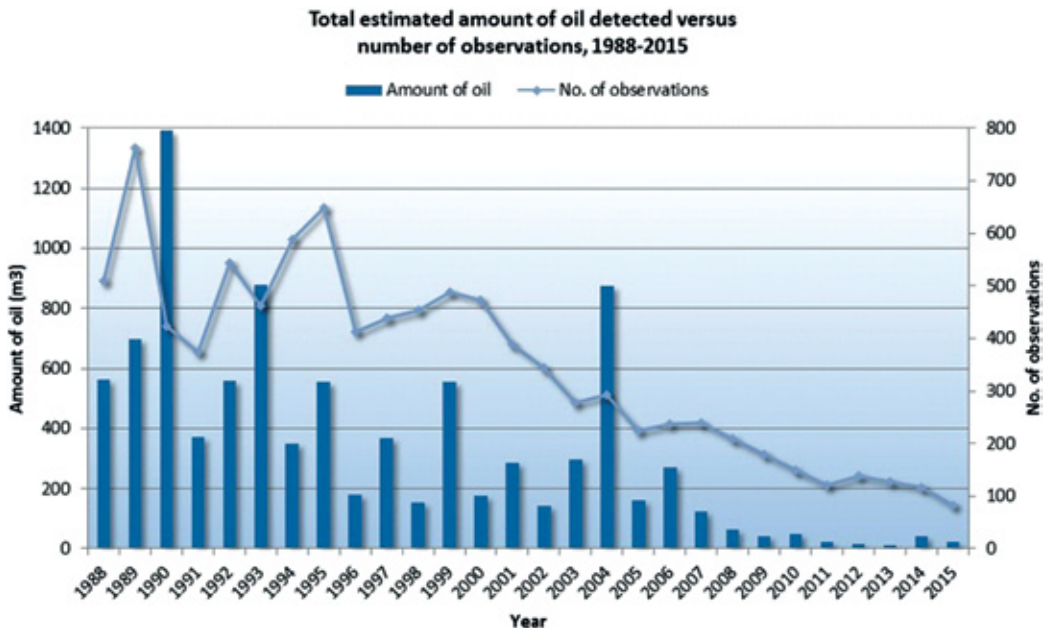


Рис. 1.8. Число наблюдений нефтяных пятен (справа) и общий объём нефтяного загрязнения (м^3) (слева) в Балтийском море в 1988–2015 гг. по данным HELCOM (<http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/hazardous-substances/illegal-discharges-of-oil-in-the-baltic-sea>)



Р и с. 1.9. Нефтяная платформа D-6 (Фото Е. В. Булычевой)

Калининградская область. Началом практической деятельности ОАО «ЛУКОЙЛ» на море можно считать 1999 г., когда Компания приступила к разведочному бурению с помощью собственной самоподъёмной плавучей буровой установки «Астра» в северной части Каспия. С тех пор «Лукойл» успешно реализовал несколько крупных уникальных проекта в трёх морях — Балтийском, Баренцевом и Каспийском.

Месторождение «Кравцовское» (D-6) в Балтийском море было открыто в 1983 г. и находится в 22,5 км от побережья Калининградской области. Глубина моря в районе месторождения составляет 25–35 м. По результатам геологоразведочных работ, проведённых «Лукойл», геологические запасы нефти категорий С1+С2 месторождения «Кравцовское» составили 21,5 млн т, извлекаемые запасы — 9,1 млн т. Объём инвестиций в обустройство месторождения составил 7,7 млрд руб.

Промышленная добыча нефти на месторождении «Кравцовское» началась в июле 2004 г. Бурение и добыча нефти ведутся с морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) D-6 (рис. 1.9).

От платформы на сушу проложен подводный трубопровод длиной 47 км, пластовая продукция — смесь нефти и попутного газа — транспортируется на нефтесборный пункт «Романово», где доводится до товарной кондиции. Береговой нефтепровод состоит из двух частей. Первая — от береговой задвижки до нефтесборного пункта (НСП) «Романово» — имеет длину 6,15 км. Вторая, подземная, часть —

от пункта «Романово» до комплексного нефтяного терминала (КНТ) «ЛУКОЙЛ-1» в посёлке Ижевский — имеет длину 31,6 км. Глубина акватории КНТ позволяет принимать танкеры дедвейтом до 20 тыс. т.

С самого начала своей работы на море «Лукойл» объявил о приоритетности охраны окружающей среды. В каждом регионе Компания организовала десятки комплексных экспедиций, провела экологический мониторинг состояния морской среды. Результаты этих исследований показали, что морские объекты «Лукойл» не являются источником загрязнения благодаря неуклонному соблюдению принципа нулевого сброса. Этот принцип означает полный запрет сброса в морскую среду всех видов отходов, образующихся в результате производственной деятельности. Все отходы собираются в герметичные контейнеры, которые затем вывозятся на берег для обезвреживания и утилизации. Принцип нулевого сброса неукоснительно соблюдается при проведении разведочного бурения, он же используется в дальнейшем, на стадии эксплуатации открытых месторождений.

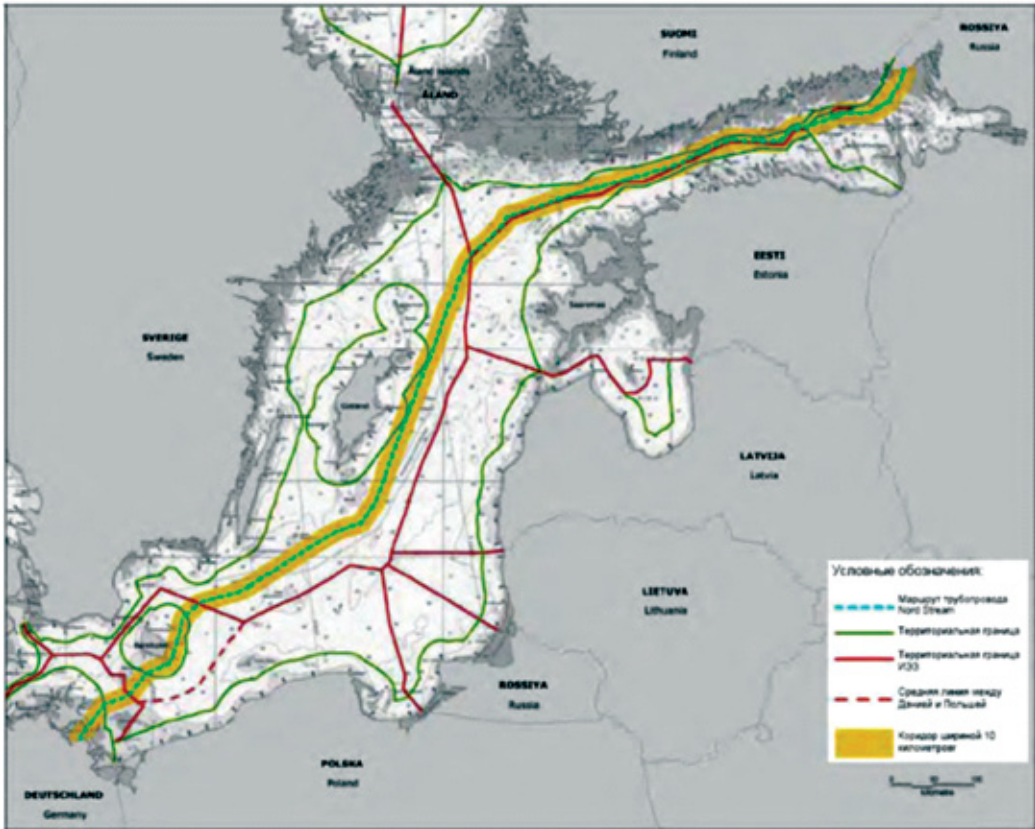
С июня 2004 г. «Лукойл» организовал спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря с целью обнаружения нефтяных пятен в районе месторождения «Кравцовское» [Булычева, Костяной, 2011, 2014; Булычева и др., 2016а, б; Костяной и др., 2012; Лаврова и др., 2011а; Bulycheva et al., 2014, 2015; Kostianou, Lavrova, 2014; Kostianou et al., 2004, 2005, 2006; Lavrova et al., 2014b]. До настоящего времени (конец 2016 г.) ни одной утечки нефти или нефтепродуктов с объектов компании в Балтийском море зафиксировано не было.

В 2015 г. порт Калининград имел полный грузооборот 12,7 млн т, из них наливные (нефть, нефтепродукты, пищевые и химические) грузы составили около 3 млн т.

Газопровод “Nord Stream”. 8 сентября 2005 г. в Берлине компании ОАО «Газпром», BASF AG и E.ON AG подписали принципиальное соглашение о строительстве Северо-Европейского газопровода (СЕГ, в настоящее время он называется “Nord Stream”, «Норд Стрим» или «Северный поток»), который начал свою работу осенью 2011 г. С помощью газопровода Германия теперь соединена с месторождениями природного газа России для обеспечения возрастающих потребностей в газе Германии, Великобритании, Нидерландов, Франции, Дании и других европейских государств.

Морской газопровод “Nord Stream” представляет собой транспортную систему, предназначенную для экспорта 55 млрд кубометров природного газа в год из России в Германию и в Европейский Союз через акваторию Балтийского моря от компрессорной станции ОАО «Газпром» вблизи бухты Портовая в Выборгском районе Ленинградской области до приёмного терминала вблизи населённого пункта Любмин в районе Грайфсвальда на северном побережье Германии. Строительство первой нитки газопровода пропускной способностью 27,5 млрд кубометров газа в год началось в апреле 2010 г. и было завершено в июне 2011 г. Первая нитка была введена в эксплуатацию 8 ноября 2011 г. Строительство второй нитки началось в мае 2011 г. и закончилось 18 апреля 2012 г., а 8 октября 2012 г. начались поставки газа по двум ниткам газопровода.

Трасса газопровода протяжённостью более 1220 км пересекает исключительные экономические зоны пяти государств — России, Финляндии, Швеции, Дании и Германии, а также воды территориальных морей России, Германии и Дании (рис. 1.10).



Р и с. 1.10. Трасса морского газопровода “Nord Stream” и морские границы государств Балтийского моря [Документация..., 2009]

Трансграничный характер газопровода “Nord Stream” обусловил необходимость проведения оценки трансграничного воздействия на окружающую среду этого проекта в рамках Конвенции об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте Европейской экономической комиссии ООН, называемой также Конвенцией Эспо [Конвенция..., 1991]. Суммарные вложения в реализацию проекта превысили 6 млрд евро. Компания потратила более 100 млн евро на экологические исследования и планирование в целях обеспечения безопасности и экологичности технического дизайна и маршрута газопровода.

1.1.2. Чёрное и Азовское моря

Чёрное и Азовское моря имеют слабый водообмен с Мировым океаном, поэтому загрязнения, попадающие в эти моря, практически в них и остаются. Большую опасность для загрязнения моря представляют объекты интенсивно развивающегося нефтегазового комплекса. На Черноморском побережье России расположено

несколько крупных нефтяных терминалов (г. Новороссийск, п. Южная Озереевка, г. Туапсе и м. Железный Рог), осуществляющих загрузку крупнотоннажных танкеров.

Только в порту Новороссийск (группа НМТП) в 2015 г. грузооборот составил 139,7 млн т (рис. 1.11 и 1.12). В 2015 г. Группа НМТП перевалила 108 млн т наливных грузов, на 6,4 % больше, чем за 2014 г. Перевалка сырой нефти превысила уровень прошлого года на 2,4 млн т и составила 75,2 млн т. Перевалка нефтепродуктов выросла на 4,1 млн т и достигла 31,9 млн т, её увеличению в порту Новороссийск способствовал рост производства и поставок ряда НПЗ на юге России, а также привлечение дополнительных объёмов вакуумного газойля. Перевалка КАС и растительных масел составила 715 и 217 тыс. т, соответственно.

Кроме того, ввод в эксплуатацию в 2002 г. морского газопровода Россия-Турция «Голубой поток», в 2010 г. — морского газопровода «Джубга-Лазаревское-Сочи», проектирование строительства газопроводов по дну Чёрного моря «Голубой поток-2» и «Турецкий поток» в Турцию, «Южный поток» в Болгарию, а также нефтепровода из Грузии в Украину, делают задачу мониторинга морской акватории Чёрного моря крайне необходимой.



Рис. 1.11. Нефтеналивной терминал «Шесхарис» в порту Новороссийск (фото А. Г. Костяного)



Р и с. 1.12. Нефтеналивной терминал КТК в районе п. Южная Озеревка
(<http://www.cpc.ru/RU/about/Pages/chronology.aspx>)

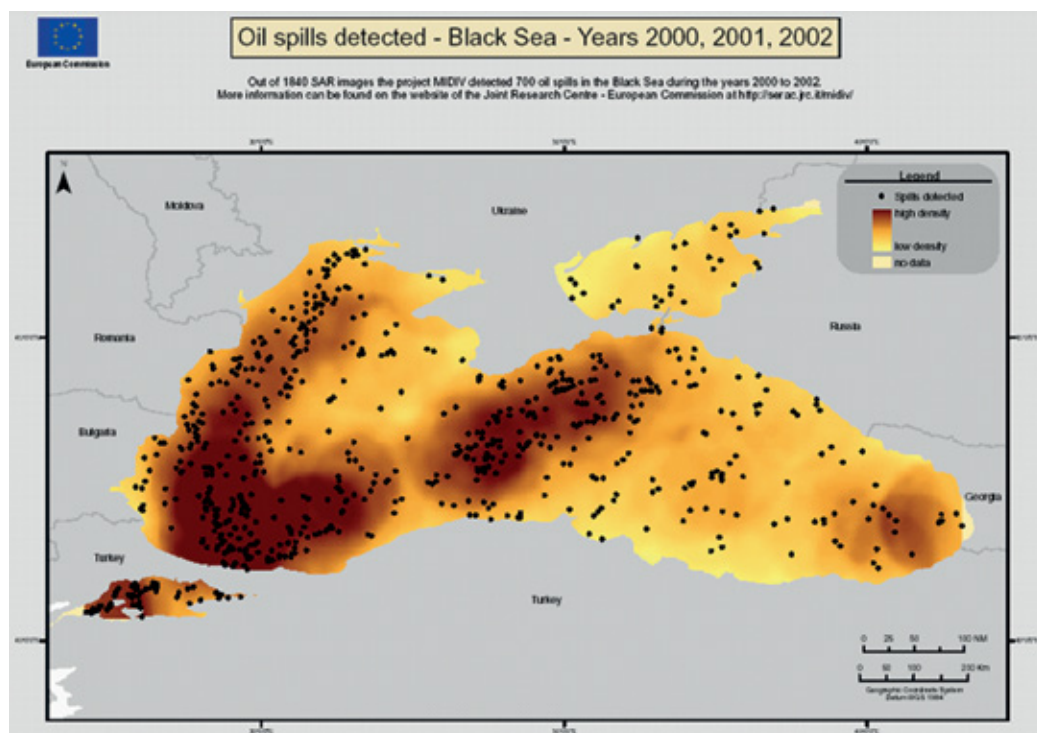
К основным источникам антропогенного загрязнения моря этого района также относятся речной сток (на российском побережье Азово-Черноморского бассейна впадает 45 малых рек), сточные воды и утечки минеральных и органических веществ из населенных пунктов и промышленных предприятий, а также сбросы с судов [Фашук, Шапоренко, 1995; Kostianou, Kosarev, 2008]. Повторяемость (в процентах от общего количества съёмов района) обнаружения нефтяных пятен интенсивностью более 250 мг/м^2 в отдельных районах Чёрного моря по данным авиасъёмов в 1981–1990 гг. составила: прибрежные воды Крыма — 37 %; Керченский пролив — 11 %, прибрежные воды Российской Федерации — 17 %, прибрежные воды Грузии — 91 % [Синицына и др., 1997]. Среди природных факторов наиболее значимыми являются биогенные загрязнения, связанные с цветением фитопланктона.

Побережье Азово-Черноморского бассейна является курортной зоной России, где ежегодно отдыхает 10–15 млн человек. Здесь расположены курорты Анапы, Геленджика, Большого Сочи, Крыма и др. В Сочи проводятся важные международные политические, экономические и культурные форумы, а в 2014 г. город стал столицей XXII зимних Олимпийских игр. Перечисленные обстоятельства накладывают повышенные требования к экологии этого региона и, прежде всего, к чистоте прибрежных вод. В связи с этим спутниковый мониторинг загрязнения водной среды, в том числе, нефтепродуктами, должен проводиться регулярно, комплексно и в оперативном режиме. Как показали события ноября 2007 г., когда в результате шторма в Керченском проливе затонуло несколько судов и огромная акватория и береговая линия

были загрязнены нефтепродуктами, отсутствие такой системы приводит к колоссальным затратам, необходимым для ликвидации последствий таких аварий.

Спутниковый мониторинг загрязнения моря нефтепродуктами, сброшенными с проходящих судов, позволил выявить районы наиболее частого сброса вдоль судовой трасс Стамбул-Новороссийск, Стамбул-Керченский пролив и Стамбул-Туапсе, а также на подходе к нефтяному терминалу мыс Железный Рог, что полностью согласуется с данными проекта OCEANIDES за 2000–2002 гг. (рис. 1.13). Другой район с повышенной антропогенной нагрузкой находится в Керченском проливе, где на якорной стоянке происходит перегрузка нефти и нефтепродуктов с малых нефтеналивных судов на крупнотоннажные танкеры. Ежегодно в рамках данной работы в российском секторе Чёрного и Азовского морей нами выявляется около 80 больших нефтяных разливов, самые крупные из которых составляют по протяжённости до 30 км и до 40 км² по площади. Это ещё раз подтверждает данные, полученные в работе [Ferraro et al., 2009], о том, что по количеству случаев и объёму сброшенных с судов нефтепродуктов судовой трассы европейских морей существенно превосходят остальные акватории.

Другой источник антропогенных загрязнений в Чёрном море — поступающие с речным стоком в период выпадения ливневых осадков в предгорьях Кавказа бытовые и промышленные отходы, нефтепродукты, удобрения и др.



Р и с. 1.13. Карта 700 нефтяных пятен, обнаруженных в Чёрном море в 2000–2002 гг. [OCEANIDES, 2003–2005]

Антропогенные загрязнения усиливаются потоками грязи с подтапливаемых площадей. Особенно это касается горных рек с незарегулированным стоком (Мзымта, Шахе и др.). В этот период в прибрежных акваториях, примыкающих к устьям рек, по спутниковым данным наблюдается существенное увеличение зон распространения внутриводной взвеси, появление локальных вспышек цветения фитопланктона, увеличение количества плавающего мусора, пены, поверхностно-активных веществ (включая плёнки нефтепродуктов). Усиление речного стока горных рек носит кратковременный характер (2-3 сут), но именно в этот период происходят самые масштабные загрязнения моря.

1.1.3. Каспийское море

Каспийская программа по защите окружающей среды отмечает, что Каспийское море подвержено возрастающему антропогенному воздействию. В результате, наблюдается рост эвтрофикации вод, загрязнение вод нефтепродуктами, тяжёлыми металлами, химическими продуктами, а также катастрофическое уменьшение биологических ресурсов Каспийского моря [Kostianou, Kosarev, 2005]. Среди задач, требующих немедленного решения, выделяется борьба с нефтяными загрязнениями. Основными источниками загрязнения моря являются: речной сток; промышленные и муниципальные стоки; добыча нефти в море и на берегу; транспортировка нефтепродуктов морем или по трубопроводам; затопление/осушение береговой зоны в результате подъёма/падения уровня Каспия.

Каспийское море является первым крупным водоёмом в мире, который начал подвергаться масштабному нефтяному загрязнению. По расчётам специалистов, с эпохи открытия Бакинской нефти в Южный Каспий поступило (при добыче и транспортировке) 2,5 млн т сырой нефти, что в корне изменило условия среды. Изношенность оборудования на старейших морских буровых платформах только ухудшает ситуацию, приводя практически к ежедневным выбросам нефтепродуктов в море. Согласно информационному сервису Каспinfo (www.caspinfo.net), интенсивная добыча нефти и газа в Каспийском регионе привела к серьёзному загрязнению воды, суши и воздуха, деградации флоры и фауны, истощению природных ресурсов, выводу из равновесия экосистем, опустыниванию и значительным потерям в биологическом разнообразии. Отрицательные изменения в окружающей среде вызвали рост заболеваемости и смертности населения, продолжительность жизни которого на 15–20 лет меньше, чем в развитых странах.

Оценки подтверждённых запасов сырой нефти в Каспийском регионе варьируются в значительных пределах. Администрация по энергетической информации (www.eia.doe.gov) оценивает эти запасы в диапазоне от 17 до 33 млрд баррелей, что сравнимо с членом ОПЕК — Катаром (минимальная оценка) и Соединёнными Штатами (максимальная оценка). Например, в Азербайджане минимальный объём нефти — 9,0 млн т — был добыт в 1997 г., затем начался рост добычи и его пик — 50,8 млн т — был достигнут в 2010 г. В последующие годы наблюдался спад: 2011 г. — 45,6; 2012 г. — 43,5; 2013 г. — 43,5; 2014 г. — 41,9 млн т. Экспорт нефти осуществляется по нефтепроводам Баку-Тбилиси-Джейхан, Баку-Супса и Баку-Новороссийск, а также железнодорожным транспортом. В Казахстане в 2012 г. было добыто 80 млн т нефти, в 2015 г. — 79,460 млн т, а в 2016 г. планируется добыть 77 млн т.

Экспорт казахстанской нефти в основном осуществляется по следующим направлениям: нефтепровод КТК в Новороссийск на побережье Чёрного моря в объёме 35,2 млн т, нефтепровод Атырау–Самара в объёме 14,6 млн т, железнодорожными путями в объёме 2,3 млн т (на 2014 г.). Более 85 % экспорта казахской нефти на внешние рынки проходит через территорию РФ. В результате добычи, транспортировки и экспорта каспийской нефти значительно возрос риск загрязнения и даже экологической катастрофы не только в Каспийском, но и в Чёрном и Средиземном морях в результате возрастающего экспорта каспийской нефти через российские и грузинские порты Чёрного моря.

Уникальность экосистемы и биоресурсов Каспийского моря на фоне активизации хозяйственной деятельности, особенно разворачивающейся морской нефтедобычи, остро ставит вопрос мониторинга его экологического состояния. Важнейшей задачей для мониторинга экологического состояния Каспийского моря является контроль загрязнений водной поверхности нефтепродуктами в условиях нарастающего развития нефтегазодобывающей отрасли во всем Каспийском регионе. Однако в начале 1990-х гг. регулярный авиационный контроль нефтяных загрязнений Каспийского, Чёрного, Азовского, Балтийского и ряда других морей России практически полностью прекратился, и в настоящее время такой мониторинг не проводится. Кроме того, за последние 25 лет значительно уменьшился объём регулярных гидрологических работ в море, а также объём информации с метеостанций и постов Росгидромета, а после распада СССР затруднён и обмен данными между государствами Каспийского региона [Бедрицкий и др., 2001].

Коллапс наблюдательной сети на Каспии делает использование спутниковой информации для оперативного контроля экологического состояния, нефтяного загрязнения и колебаний уровня Каспийского моря безальтернативным. В сложившейся ситуации организация спутникового мониторинга Каспийского моря становится всё более актуальной задачей [Костяной, 2003; Костяной, Лобковский, 2003; Лебедев, Костяной, 2004, 2005].

В ноябре 1995 г. в рамках Государственной программы по изучению Каспийского шельфа «Лукойл» начал геолого-геофизические работы на Северном и Среднем Каспии. В 1999 г. «Лукойл» начал разведочное бурение с помощью самоподъёмной плавучей буровой установки (СПБУ) «Астра», которая была модернизирована на астраханском судостроительном заводе «Красные баррикады». СПБУ представляет собой трёхпорную платформу с высотой опорных колонн 66 м. Установка позволяет проводить буровые работы на глубине моря до 45 м и глубиной скважин до 5 тыс. м.

К настоящему времени на лицензионных участках компании «Лукойл» в Каспийском море открыто восемь крупных месторождений нефти и газа, а также выявлено 16 перспективных структур. Среди них особенно выделяется газонефтяное месторождение имени Владимира Филановского — самое крупное по запасам нефти месторождение, открытое за последние 20 лет в Российской Федерации. На текущем этапе изученности извлекаемые запасы этих месторождений превышают 1 млрд т условного топлива. Таким образом, Каспий является для «Лукойл» одним из ключевых регионов роста добычи нефти и газа в среднесрочной перспективе.

Промышленная добыча нефти на первом северо-каспийском месторождении имени Юрия Корчагина началась в конце апреля 2010 г. Месторождение расположено в 180 км от Астрахани и 240 км от Махачкалы (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Месторождения имени Юрия Корчагина, Владимира Филановского, Ракушечное, Хвалынское и др. (<http://neftegaz.ru/images/filankovskoe27.jpg>)

Глубина моря в районе месторождения составляет 11–13 м. Запасы месторождения по категориям 3Р (возможные, вероятные и доказанные) оцениваются в 570 млн баррелей нефтяного эквивалента. Максимальный уровень добычи нефти и газового конденсата составляет 2,3 млн т в год и 1,2 млрд кубометров газа в год.

Для обеспечения добычи углеводородов и их дальнейшей транспортировки обустраивают месторождения имени Юрия Корчагина включает ряд крупных морских сооружений. Основным производственным объектом месторождения является морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП), состоящая из двух частей. На одной платформе установлен буровой комплекс грузоподъемностью 560 т для бурения скважин с максимальной длиной по стволу до 7400 м.

Нефть с месторождения имени Юрия Корчагина поступает на морской перегрузочный комплекс (МПК) по подводному трубопроводу протяженностью 58 км. МПК включает в себя плавучее нефтехранилище (ПНХ) и точечный причал (ТП). Комплекс предназначен для загрузки нефтью танкеров-челноков дедевейтом 10–12 тыс. т, обеспечивающих доставку сырья с месторождения имени Юрия Корчагина (рис. 1.15). ПНХ пришвартовано к ТП, через который на него подается нефть, поступающая по подводному трубопроводу. В работах по строительству и обустройству месторождения имени Юрия Корчагина занята целая флотилия «Лукойл», состоящая из шести судов обеспечения.

Летом 2015 г. «Лукойл» сообщил, что намерен отложить разработку некоторых месторождений газа в Каспийском море из-за их нерентабельности, и собирается перебросить соответствующие объемы инвестиций на нефтедобычу. В 2016 г. должно быть запущено месторождение имени Владимира Филановского, а месторождение Ракушечное с запасами нефти 15 млн т должно быть введено раньше — в 2019 г., а не 2021 г., как планировалось (см. рис. 1.14).



Р и с. 1.15. Нефтяная платформа имени Юрия Корчагина
(http://www.nvn.lukoil.com/main/content.asp?art_id=18172)

Выявленная нами в ходе проводимых ранее спутниковых наблюдений [Лаврова и др., 2005; Митягина, Лаврова, 2012; Kostianoy et al., 2007a; 2011; 2014a; Lavrova et al., 2006a, b, 2007, 2008b] картина поверхностных загрязнений Каспийского моря нефте-содержащими плёнками существенным образом отличается от ситуаций, сложившихся в Чёрном и Балтийском морях, и во многом предопределяется природными особенностями Каспийского моря, главной из которых является наличие больших запасов нефти и газа в его недрах. В центральной части Каспийского моря и в области Апшеронского и Бакинского архипелагов основным источником поверхностного загрязнения открытых участков моря является поступление нефти при добыче и разведочном бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий, а также из естественных и особенно искусственных грифонов (выход нефти на поверхность моря). Известно, например, что за время разбуривания месторождения Нефтяные камни до 1958 г. грифонообразование имело место в 37 скважинах. При этом грифоны некоторых скважин действовали от нескольких дней до двух лет, а количество выбрасываемой нефти во время действия грифона колебалось от 100 до 500 т в сутки [Маилян, 1966]. И сегодня искусственные грифоны остаются одним из источников нефтяного загрязнения этого района.

Ретроспективный анализ и сравнение современных спутниковых данных с архивными данными за 2003–2007 гг. показывает, что ситуация практически не меняется. На подавляющем большинстве спутниковых изображений этого района иден-

тифицируются нефтяные загрязнения вокруг районов нефтедобычи, причём площадь нефтяного загрязнения морской поверхности вокруг морских буровых платформ, выявляемая по спутниковым данным, иногда достигает более 800 км². На рис. 1.16 представлен фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным сенсора OLI Landsat-8. Изображение получено над районом нефтедобычи Нефтяные Камни 21 августа 2016 г. Общая площадь нефтяных загрязнений, видимых на представленном фрагменте, достигает 290 км². Существующая ситуация соответствует регулярному ежедневному загрязнению морской поверхности значительными количествами нефти. При росте темпов нефтяного освоения Каспия и отсутствии государственного контроля деятельности нефтяных компаний в будущем можно погубить всё живое в водоёме. Поэтому спутниковый мониторинг антропогенных загрязнений на Каспии становится чрезвычайно актуальным.

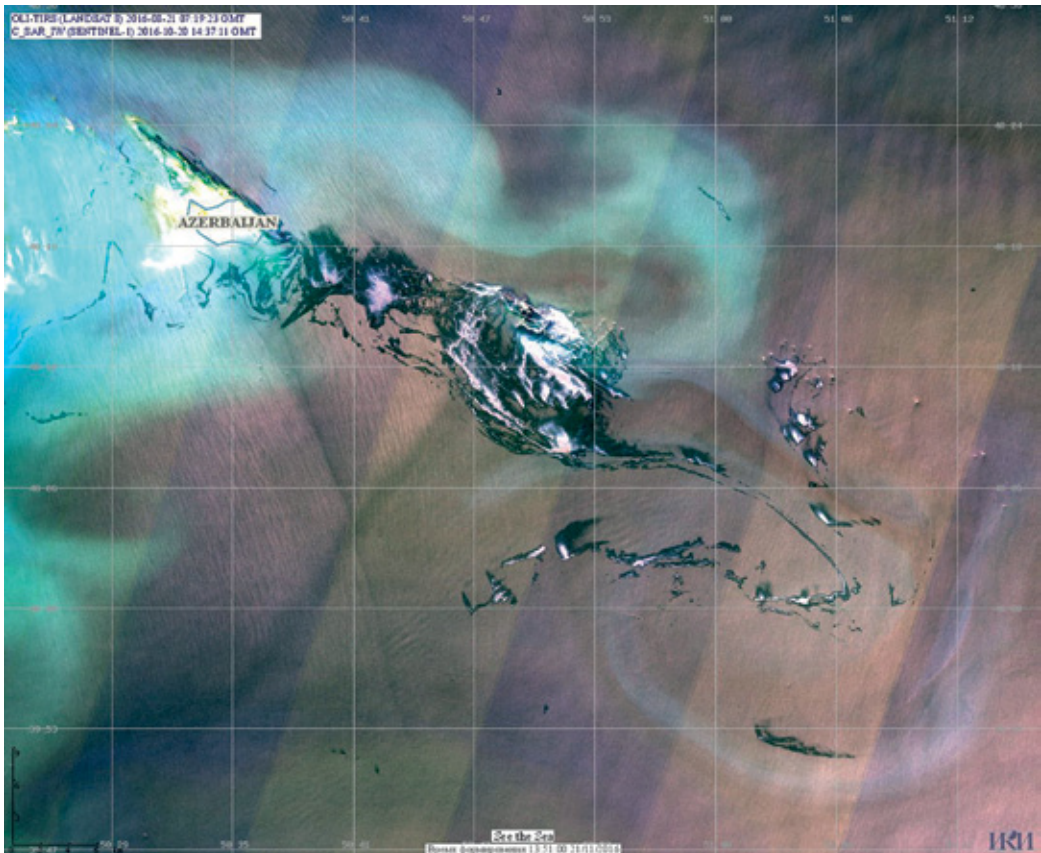


Рис. 1.16. Цветосинтезированное (каналы: 640–670 нм красный; 530–590 нм зелёный; 450–510 нм синий) изображение сенсора OLI ИСЗ Landsat-8, полученное 21.08.2016 г. в 07:19 UTC в зоне солнечного блика над районом Нефтяные Камни. Нефтяное загрязнение морской поверхности проявляется в виде характерного яркого радужного пятна с тёмным ореолом

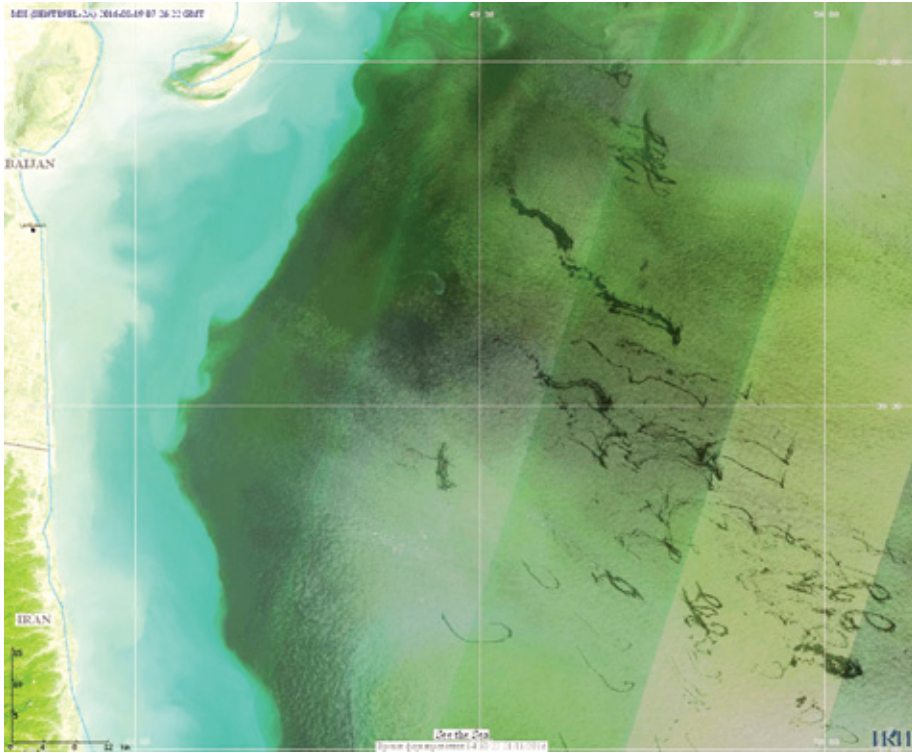


Рис. 1.17. Цветосинтезированное (каналы: 650–680 нм красный; 542–590 нм зелёный; 456–523 нм синий) изображение сенсора MSI ИСЗ Sentinel-2, полученное 19.08.2016 г. над Южно-Каспийской впадиной

На северо-западном борту Южно-Каспийской впадины сконцентрировано большое количество крупных подводных вулканов (более 300). Считают, что «корни» некоторых грязевых вулканов Азербайджана достигают глубины 10–11 км. Таким образом, вулканы несут на поверхность Земли геологическую информацию о нефтегазонасности глубоких горизонтов без бурения специальных сверхглубоких скважин. Можно сказать, что жерла грязевых вулканов являются природными скважинами, ибо продукты извержения вулканов — горные породы, насыщенные нефтью и газом, свидетельствуют о нефтегазонасности недр. Грязевые вулканы периодически извергаются, причём периодичность извержений зависит от колебательных тектонических движений земной коры и от скорости накопления давления газа в жерлах вулканов. Большинство грязевых вулканов Южно-Каспийской впадины находится в грифоновой стадии развития, выделяя илистую грязь, воду, газ и нефть [Алиев, 2006; Алиев, Рахманов, 2008]. Активизация подводных вулканов и грифонов в местах разгрузки углеводородов приводит к появлению на морской поверхности грязевых и нефтяных пятен, хорошо различимых на спутниковых снимках. Пример проявления загрязнения морской поверхности Южного Каспия в результате деятельности подводных вулканов на спутниковых изображениях представлен на рис. 1.17, где приведён фрагмент цветосинтезированного по данным сенсора MSI Sentinel-2 изображения,

полученного над Южно-Каспийской впадиной 19 августа 2016 г. На изображении отчетливо видны темные грифонные пятна, обусловленные выбросами со дна моря пластовых вод, газов, нефти и брекчии, отличающиеся характерными петельчатыми и подковообразными формами.

1.2. ВЗВЕШЕННОЕ ВЕЩЕСТВО

Балтийское море относительно мелководное, поэтому большое количество взвешенного вещества образуется в результате вертикального перемешивания (взмучивания) при сильном волнении на мелководье. Прозрачность балтийских вод постоянно падает. Так, например, в северной Балтике она снизилась с 9 м (по диску Секки) в 1914–1939 гг. до 6 м в настоящее время [Hopkins, 2000]. Эта же тенденция наблюдается и в южной Балтике и ряде прибрежных зон. Взмучивание вод происходит наиболее интенсивно в осенне-зимний период, когда скорость ветра наибольшая. Численные эксперименты по образованию и переносу взвешенного вещества в Балтийском море показали, что во многих случаях взвешенное вещество распространяется от поверхности до дна [Kuhrt et al., 2004]. Этот факт и спутниковые изображения, представленные ниже, подтверждают возможность и необходимость спутникового мониторинга взвешенного вещества в районе строительства портов, терминалов, нефте- и газопроводов.

На рис. 1.18–1.20 представлены спутниковые изображения распределения взвешенного вещества по акватории восточной и юго-западной Балтики в апреле 2004–2005 гг. Трасса газопровода “Nord Stream” нанесена оранжевым цветом. Взвешенное вещество проявляется в виде областей со светлыми тонами. Чем светлее область, тем больше концентрация взвешенного вещества. На этих рисунках видно, что области с большим содержанием взвешенного вещества распределены, в основном, вдоль побережий в виде полосы шириной до 70 км, причудливой формы, объясняемой мезомасштабными динамическими процессами, которые и перераспределяют взвешенное вещество по акватории Балтики. На рис. 1.18 обращает на себя внимание «факел» мутных вод, выходящий из Куршского залива в районе Клайпеды. На рис. 1.19 видно, что взвешенное вещество перераспределяется вихрями и течениями по всей акватории юго-западной Балтики, вплоть до центральной части моря. Взвешенное вещество также поступает со стоком рек и в результате выноса вод из заливов, что проявляется наиболее ярко во время половодий. Рисунок 1.20 демонстрирует вынос огромного количества взвешенного вещества из устья Вислы в Гданьском заливе во время весеннего паводка. Такой речной плюм может распространяться на расстояние до 150 км от устья реки, чему способствуют вдольбереговые течения и мезомасштабные вихри, струи и диполи [Гинзбург и др., 2015].

На рис. 1.21, 1.22 представлена осенняя картина распределения взвешенного вещества, которая мало отличается от характерных особенностей распределения взвешенного вещества весной. Огромные площади с большой концентрацией взвешенного вещества у побережья и вокруг островов Эстонии, вдоль побережья Латвии и Литвы, в Куршском и Вислинском заливах, немного меньше вдоль побережья Готланд. Наиболее ярко это проявляется на рис. 1.22 по уровню восходящей радиации.

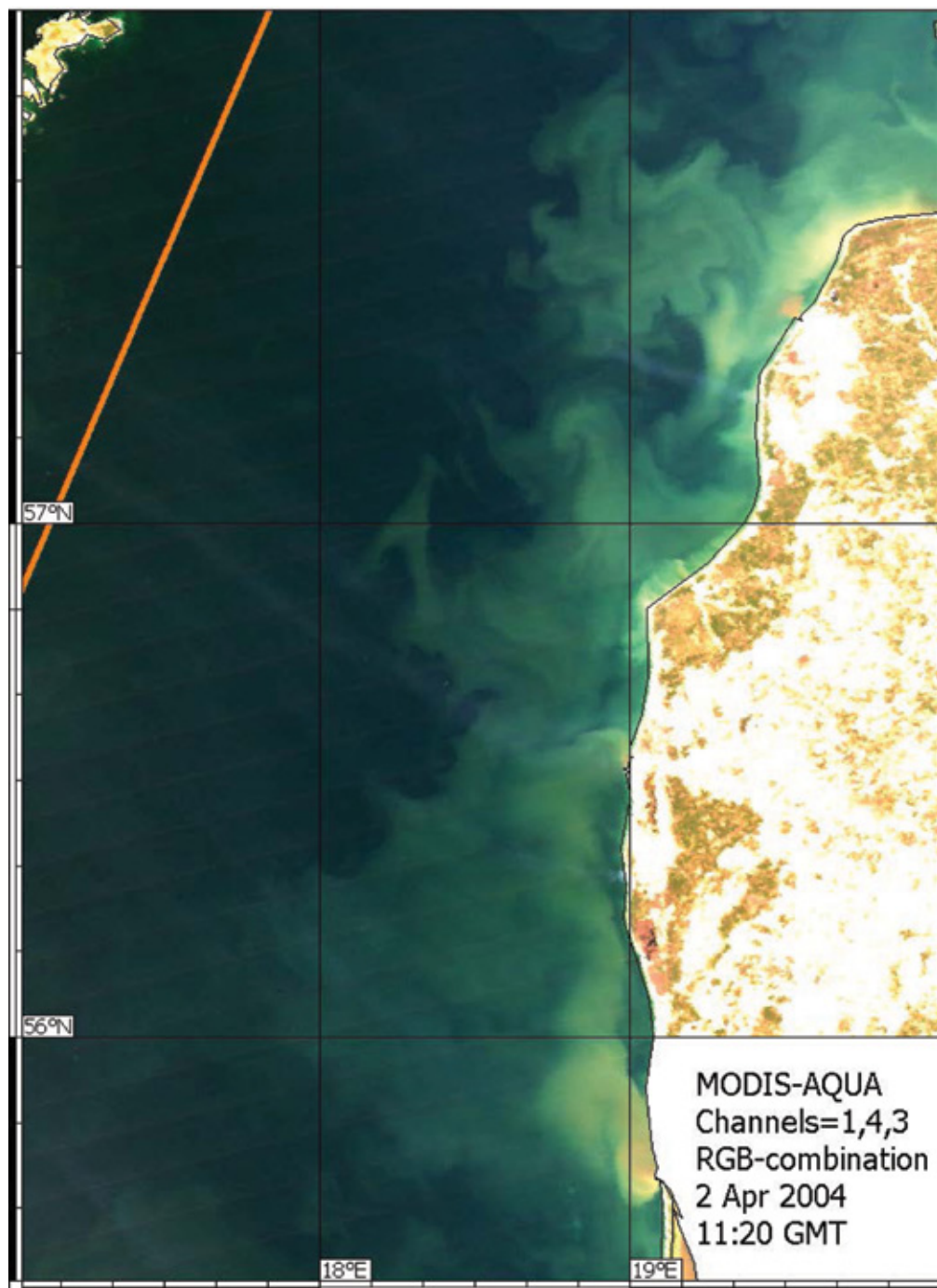
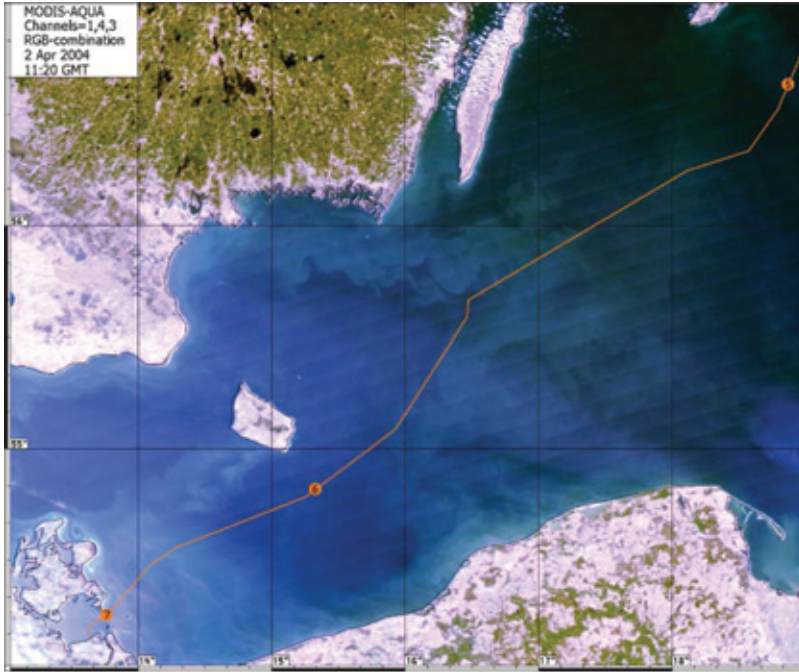
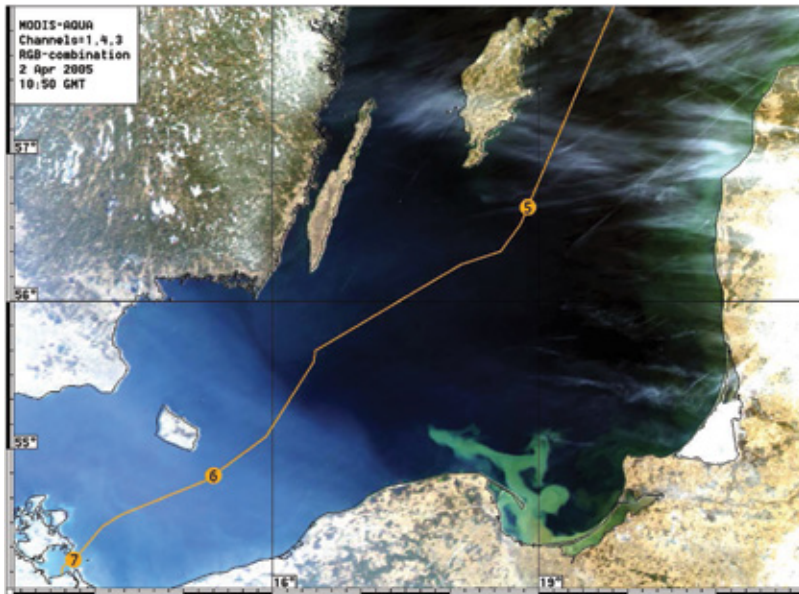


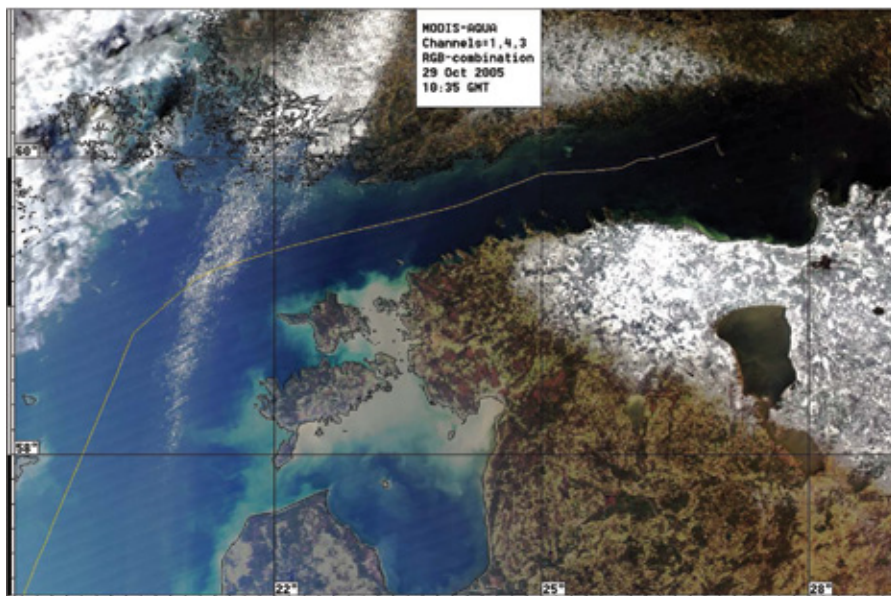
Рис. 1.18. Распределение взвеси на поверхности центральной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Aqua 02.04.2004 г.



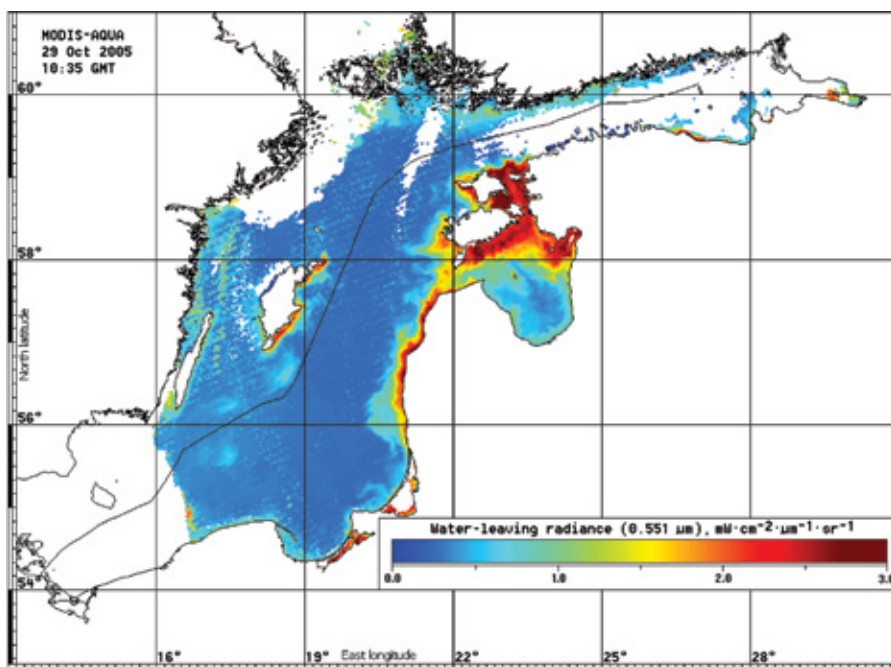
Р и с. 1.19. Распределение взвеси на поверхности юго-западной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Aqua 02.04.2004 г.



Р и с. 1.20. Распределение взвеси на поверхности южной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Aqua 02.04.2005 г.



Р и с. 1.21. Распределение взвеси на поверхности северо-восточной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Aqua 29.10.2005 г.



Р и с. 1.22. Распределение взвеси на поверхности Балтики по уровню восходящей радиации по данным MODIS Aqua 29.10.2005 г.

1.3. ЦВЕТЕНИЕ ВОД

Ежегодное цветение сине-зелёных водорослей (цианобактерий) в Балтийском море является чрезвычайно важной и нарастающей проблемой, которой постоянное внимание уделяет Хельсинкская Комиссия и национальные экологические службы. HELCOM отмечает, что цветение сине-зелёных водорослей в Балтийском море напрямую связано с проблемой эвтрофикации вод — переизбытка питательных веществ (азота и фосфора) в воде, вызванного городскими сточными водами и приносимыми в море сельскохозяйственными удобрениями. Так, например, тёплая, тихая и солнечная погода вместе с высокой концентрацией питательных веществ в июле-августе 2004—2006 гг. привели к широко распространившемуся и интенсивному цветению вод Балтики. Площади, занимаемые цветением вод, достигали 200 тыс. км², а частота и продолжительность этого явления растут от года к году [Hopkins, 2000].

В литературе описано более 1500 видов сине-зелёных водорослей [Громов, 1996]. Многочисленные цианобактерии (в 40—50 % случаев) образуют токсины, губительные для животных и человека. При цветении вод накапливается огромная биомасса цианобактерий, которые скоро отмирают, и начинается их гниение. Из воды исчезает кислород, появляются продукты гниения, и среда становится непригодной для жизни водных организмов, в том числе и рыб. Ещё в 1878 г. в журнале “Nature” была опубликована статья, в которой сообщалось о гибели лошадей, свиней, собак из-за потребления воды из водоема, в котором наблюдалось массовое развитие сине-зелёных водорослей [Громов, 1996]. В настоящее время развитие токсигенных цианобактерий приобретает глобальный характер, что связано с усилением антропогенного загрязнения водоемов. В условиях северных морей происходит массовое развитие нитчатой цианобактерии — *Nodularia spumigena*. Эта цианобактерия образует гепатотоксин, поэтому её массовое развитие в Балтийском море вызывает большое беспокойство в странах Балтии. В условиях морской среды цианобактерии развиваются также на дне, на поверхности различных предметов и организмов [Громов, 1996]. Поэтому зачастую цветение вод на Балтике приводит к запрету на купание.

На спутниковых изображениях (рис. 1.23, 1.24) представлены примеры цветения вод различных районов Балтики 6 августа 2014 г. Светлые тона указывают на области цветения вод. Красной линией нанесена трасса газопровода “Nord Stream”. По этим данным видно, что цветение вод занимает практически всю акваторию Балтийского моря, включая Финский залив. Цветение обычно начинается в июле с установлением очень тёплой погоды на Балтике и продолжается 1,5–2 месяца. Однако в 2005 г. первые вспышки цветения вод наблюдались уже в конце мая. С тех пор интенсивность и продолжительность цветения вод на Балтике только растёт (см. разд. 3.4).

В июле 2005 г. цветение водорослей было особенно бурным, а их скопления настолько плотными в некоторых частях моря, что на спутниковых изображениях они проявлялись в виде областей с золотистой окраской (рис. 1.25–1.27). Этот эффект достигается за счёт большого сигнала во втором канале (около 1 мкм) сканера MODIS, который «видит» только тонкий поверхностный слой, поэтому даже очень мутная вода в этом канале практически не даёт сигнала в рассеянии. Водоросли как ковёр устилают водную поверхность, и во втором канале она проявляется как суша. На рис. 1.28 представлена фотография бурного цветения водорослей, сделанная с СТМ «АтлантНИРО» А. М. Сиротой (ИО РАН) 28 мая 2005 г. в юго-восточной части Балтийского моря.

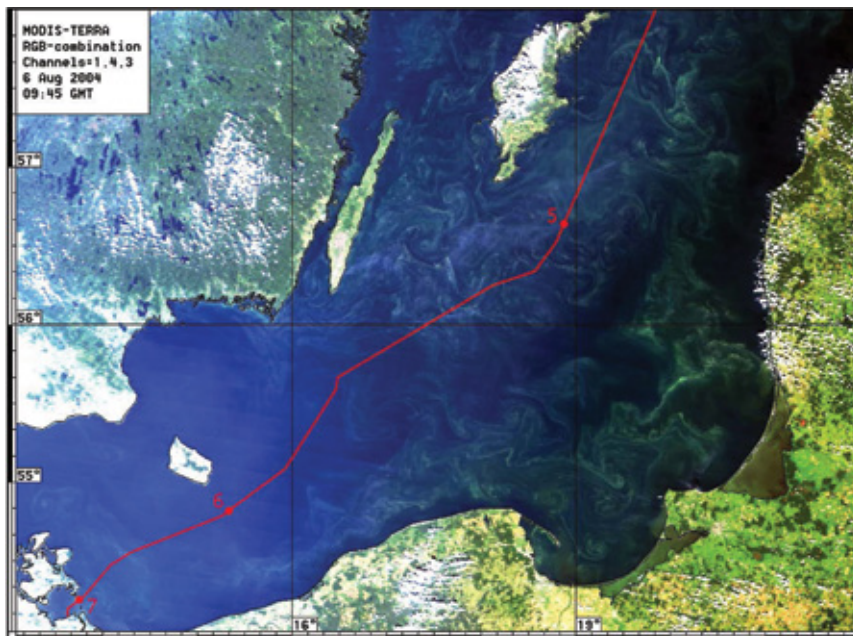


Рис. 1.23. Оптические характеристики (цветение вод) поверхности южной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Terra 6 августа 2004 г. (09:45 GMT)

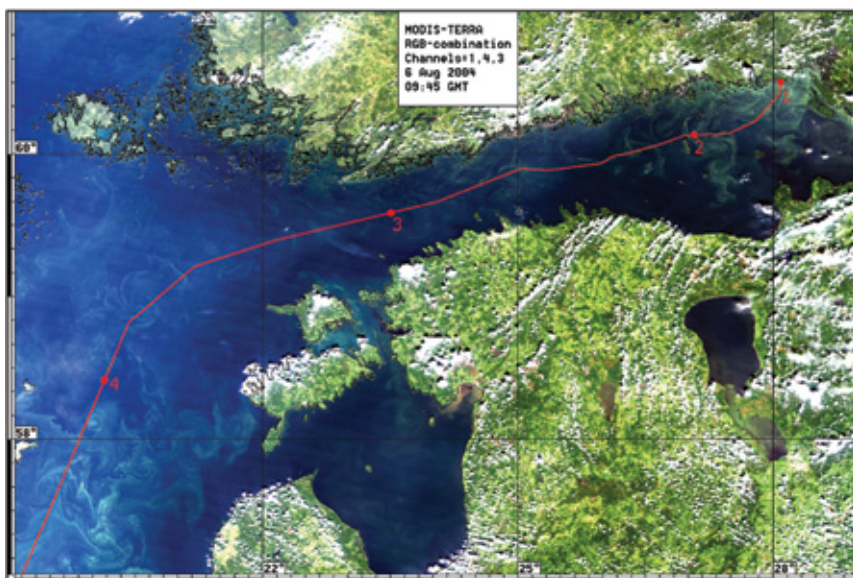
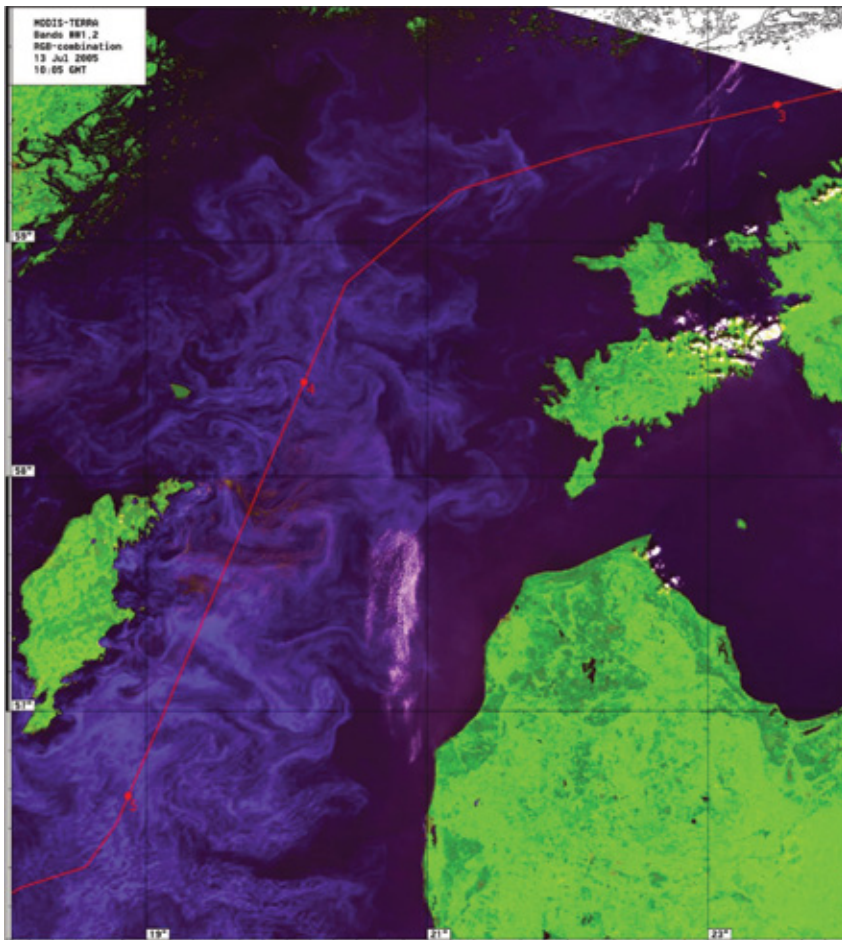


Рис. 1.24. Оптические характеристики (цветение вод) поверхности северо-восточной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Terra 6 августа 2004 г. (09:45 GMT)

Такие области в начале июля 2005 г. занимали огромные площади к северо-востоку от Готланда, затем они сместились к югу до широты Готланда (см. рис. 1.25).

Спутниковое изображение, полученное 13 июля 2005 г., показывает полную картину цветения вод в центральной и южной Балтике (см. рис. 1.26). Цветение вод летом 2006 г. повторилось с той же интенсивностью, максимум которого наблюдался в юго-западной части Балтийского моря (см. рис. 1.27).

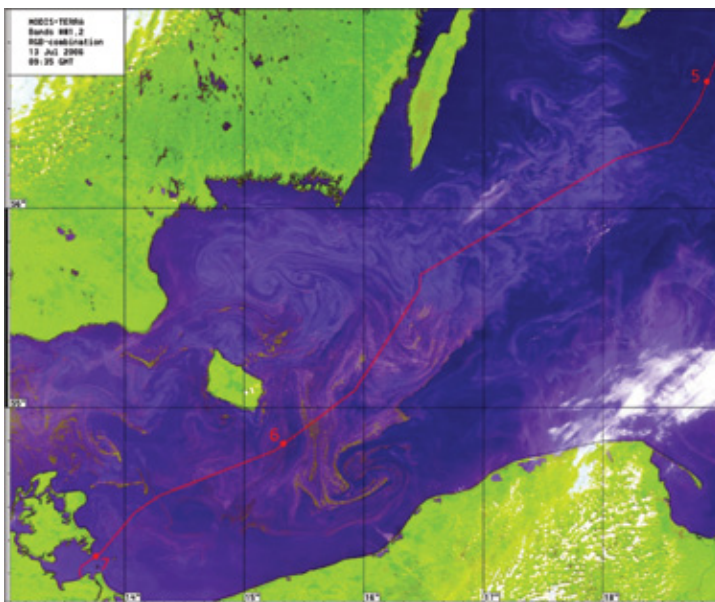
Кроме того, цветение вод и взвешенное вещество являются великолепным трасером для выявления мелкомасштабных и мезомасштабных динамических структур (течения, вихри, струи, диполи и пр.), которые и перераспределяют все загрязнения по акватории Балтики (Гинзбург и др., 2015). Последовательность таких изображений позволяет также восстанавливать поля течений, необходимые для прогноза адвекции загрязнений, включая нефтяные.



Р и с. 1.25. Оптические характеристики (цветение вод) поверхности южной и центральной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Terra 13 июля 2005 г. (10:05 GMT)



Р и с. 1.26. Оптические характеристики (цветение вод) поверхности южной и центральной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 4, 3, разрешение 500 м) по данным MODIS Terra 13 июля 2005 г. (10:05 GMT)



Р и с. 1.27. Оптические характеристики (цветение вод) поверхности южной Балтики (в псевдоцветах по комбинации каналов 1, 2, разрешение 250 м) по данным MODIS Terra 13 июля 2006 г. (09:35 GMT)



Р и с. 1.28. Бурное цветение водорослей в юго-восточной Балтике 28 мая 2005 г.
(фотография морской поверхности, сделанная А. М. Сиротой)

Глава 2

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ РАБОТЫ С ДАННЫМИ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

2.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

В настоящее время на орбите функционирует большая группировка специализированных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с научной аппаратурой на борту, работающей в разных диапазонах электромагнитного спектра. Различные активные и пассивные сенсоры способны детектировать видимую, инфракрасную и микроволновую области электромагнитного спектра. Огромные размеры Мирового океана и большая изменчивость его характеристик затрудняют сбор *in-situ* сведений о процессах и явлениях, происходящих в самом океане и атмосфере над ним, поэтому значение наблюдений океана из космоса невозможно переоценить. Точность и разрешающая способность современных приборов постоянно растёт, и одновременно расширяется набор параметров, характеризующих состояние океанов и морей, которые могут быть измерены из космоса. Не претендуя на полномасштабный обзор всей этой группировки, состав которой непрерывно изменяется за счёт выведения на орбиту различными странами и космическими агентствами новых спутников и прекращения функционирования старых, мы приводим краткое описание спутниковых данных, которые были использованы нами для мониторинга загрязнений Балтийского, Чёрного и Каспийского морей. Наши исследования базировались в первую очередь на радиолокационных изображениях, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) SAR ERS-1, -2, ASAR Envisat, Radarsat-1, -2, TerraSAR-X, TanDEM-X, SAR-C Sentinel-1A, -1B. Краткие сведения об этих радиолокаторах представлены в табл. 2.1.

В настоящее время радиолокационное (РЛ) зондирование в СВЧ-диапазоне является одним из основных методов дистанционного исследования как океанических процессов, так и процессов взаимодействия океана и атмосферы. С точки зрения получения океанологической информации о мгновенном состоянии океана радиолокационная съёмка океана из космоса предоставляет широкие возможности:

- круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования, причём характеристики изображения от времени суток не зависят;

- практически всепогодной съёмки, так как атмосфера практически прозрачна для используемого в радиолокации микроволнового излучения;
- диэлектрические свойства воды в микроволновом диапазоне однородны, что позволяет считать вариации рассеянного сигнала связанными только с геометрическими параметрами возмущений и тем самым облегчает интерпретацию радиолокационных изображений (РЛИ);
- получения современными радиолокаторами спутникового базирования изображений с высоким пространственным разрешением (вплоть до единиц метров) в широкой полосе обзора.

Т а б л и ц а 2.1. Краткие сведения
о спутниковых радиолокаторах с синтезированной апертурой

ИСЗ	ERS-1, -2	Radarsat-1	Envisat	Radarsat-2	Terra-SAR-X, TanDEM-X	Sentinel-1A, -B
Страна, Космическое агентство	Европей- ское кос- мическое агентство	Канада, Канад- ское кос- мическое агентство	Европей- ское кос- мическое агентство	Канада, Канадское космиче- ское агент- ство и MDA	Германия, Немецкий аэрокосми- ческий центр (DLR)	Европейское космическое агентство
Год вывода на орбиту, завер- шения миссии	1991– 2000, 1995– 2011	1995– 2013	2002– 2012	2007 — наст. время	2008 — наст. время	2014 — наст. время, 2016 — наст. время
Диапазон	C	C	C	C	X	C
Частота зон- дирующего сигнала, ГГц	5,25	5,3	5,7	5,3	9,65	5,405
Длина волны зондирующего сигнала, см	5,66	5,66	5,66	5,66	3,13	5,55
Поляризация	ВВ	ГГ	ГГ, ВВ, ВГ, ГВ	ГГ, ВВ, ВГ, ГВ	ГГ, ВВ, ВГ, ГВ	ГГ/ГВ или ВВ/ВГ
Угол падения, град	23	20–50	15–45	20–60	20–55	20–45
Ширина по- лосы обзора по наземной дальности, км	100	50–500	56–400	18–500	10/30/100	20/80/250/400
Простран- ственное раз- решение, м	25	8–100	25–150	3–100	1/3/16	5×5; 5×20; 25×80; 20×40; 5×5

Активное дистанционное зондирование земной поверхности основано на измерении вариаций рассеянного излучения. При использовании радиолокационной станции (РЛС) в дистанционном зондировании океана информация о параметрах подстилающей поверхности заключена в функции отражения, которая наблюдается

в зоне приёмной антенны в виде отражённой от объекта электромагнитной волны. Функция отражения определяется не только свойствами объекта, но и условиями её формирования, т.е. системой испускаемых и принимаемых сигналов. Радиолокационный образ морской поверхности зависит от диапазона зондирования, поляризации излучения и угла падения зондирующего сигнала.

Излучающее устройство радиолокатора передаёт электромагнитную волну; её характеристиками являются: длина λ ; частота f , $f = C/\lambda$, где C — скорость распространения электромагнитных волн в среде (в вакууме $3 \cdot 10^8$ м/с); волновой вектор, указывающий направление распространения волны; очень важное свойство также поляризация электромагнитной волны — от положения плоскости поляризации по отношению к отражающей поверхности зависит коэффициент отражения волны.

Для изучения океана используются радиолокаторы с длинами волн от 1,11 см (частота $f = 27$ ГГц) до 30 см (частота $f = 1$ ГГц). Обычно подобные радиолокаторы работают в импульсном режиме, хотя иногда применяют и непрерывное излучение.

В практике радиолокационного зондирования Земли используются зондирующие сигналы с различной поляризацией (горизонтальной, вертикальной или перекрёстной с различной комбинацией горизонтальной и вертикальной поляризаций). Плоскость, проходящая через направление распространения электромагнитной волны и направление вектора электрического поля, называется плоскостью поляризации. Поляризация излучения определяется вектором электрического поля \vec{E} в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения радиоволны. При горизонтальной поляризации излучения вектор электрического поля $\vec{E}_Г$ параллелен подстилающей поверхности; при вертикальной — вектор излучения $\vec{E}_В$ направлен под углом падения к местной вертикали (рис. 2.1).

В зависимости от конструктивных особенностей и режима работы РЛС приёмопередающие системы могут осуществлять излучение и приём:

- на вертикальной (ВВ) поляризации;
- горизонтальной (ГГ) поляризации;
- перекрёстных поляризациях (ВГ и ГВ).



Р и с. 2.1. Вектор электрического поля при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирующего сигнала

Мощность обратно-рассеянного сигнала, попадающего в приёмную антенну РЛС, зависит от поляризации излучения и от взаимного направления поляризаций при излучении и приёме. В общем случае, коэффициент рассеяния водной поверхности при вертикальной поляризации выше, чем при горизонтальной и перекрёстных поляризациях.

ВВ-поляризация применяется для изучения широкого класса процессов и явлений, проявляющихся на морской поверхности посредством модуляции гравитационно-капиллярной составляющей спектра поверхностного волнения.

ГГ-поляризация, будучи менее чувствительной к вариациям мелкомасштабной шероховатости морской поверхности, широко применяется для наблюдения морских льдов и разделения РЛ-сигнатур ледового покрова и открытой воды.

Поскольку интенсивность рассеяния морской поверхности существенно понижается при использовании излучения и приёма на перекрёстных поляризациях (ВГ и ГВ), такие режимы используются для выделения на морской поверхности объектов, обуславливающих многократное рассеяние, таких, например, как корабли и деформации ледового покрова (торосы, трещины, расколотый лёд).

Данные видимого и инфракрасного диапазонов электромагнитного спектра были получены следующими сенсорами: MODIS Terra/Aqua, MERIS Envisat, TM Landsat-5, ETM+ Landsat-7, OLI/TIRS Landsat-8, MSI Sentinel-2A.

Подробную информацию об основах спутниковой радиолокации и спутниковом зондировании в оптическом диапазоне можно найти в работе [Лаврова и др., 2011а] и в цитируемой в монографии литературе.

2.1.1. Искусственные спутники Земли ERS-1, -2

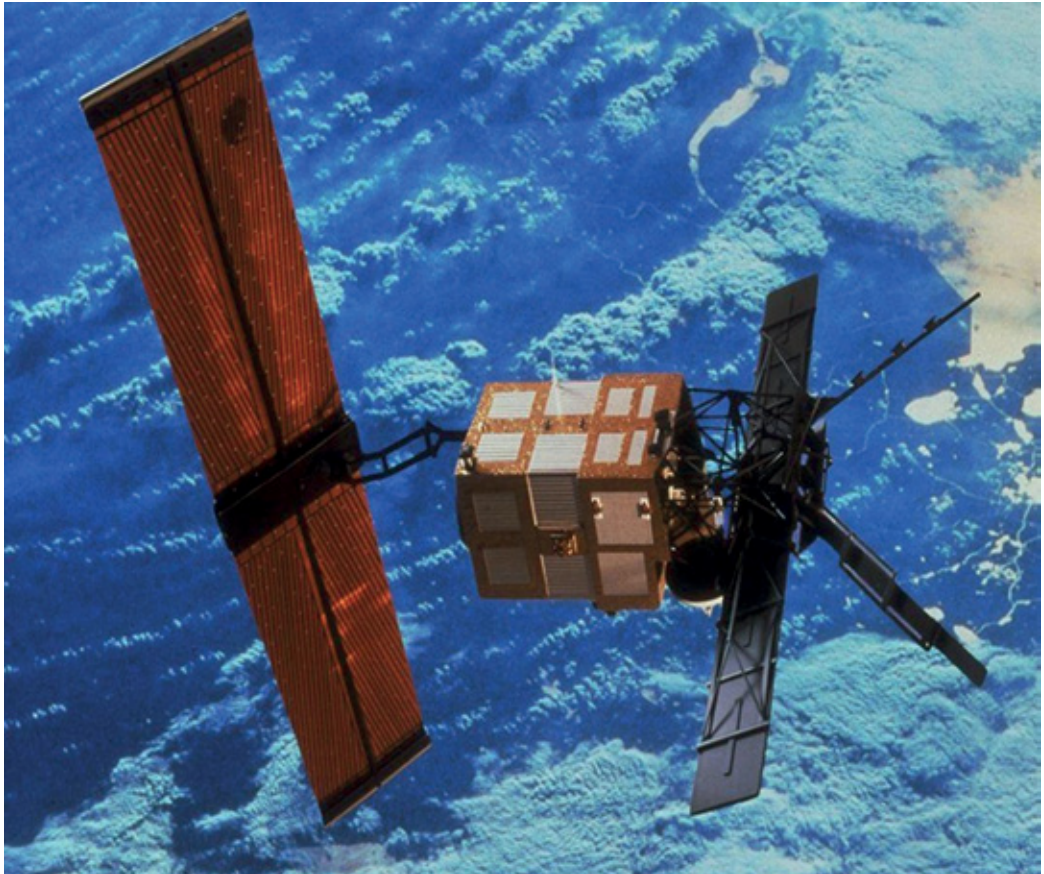
Спутниковая система *ERS* (*European Remote Sensing*) разрабатывалась Европейским космическим агентством (ЕКА) с начала 80-х гг. прошлого века. 17 июля 1991 г. на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 785 км и наклоном $98,5^\circ$ был запущен первый аппарат серии — ERS-1. Второй спутник серии — ERS-2, ставший приёмником и конструктивным аналогом ERS-1, был выведен на такую же орбиту 21 апреля 1995 г. Расчётный срок пребывания на орбите спутника ERS-1 оценивался в три года, однако аппарат успешно проработал до 10 марта 2000 г., что позволило в течение почти пяти лет использовать группировку из двух спутников ERS-1, -2, обеспечивавшую удвоенную частоту съёмки подстилающей поверхности. Кроме того, был проведён ряд экспериментов по радиолокационной интерферометрии, в частности, реализован проект “ERS Tandem”. Срок пребывания на орбите аппарата ERS-2 планировался на два года, однако, несмотря на мелкие неисправности, он проработал 16 лет — до 5 сентября 2011 г.

На спутнике ERS-1 было установлено пять приборов:

1. *AMI-SAR* (*Active Microwave Instrument — Synthetic Aperture Radar*) — СВЧ-сенсор, сочетающий в себе возможности работы в режиме как радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) для получения изображений подстилающей поверхности в полосе шириной 100 км с пространственным разрешением 30 м, так и в режиме ветрового скаттерометра для измерения характеристик поля приводного ветра и поверхностного волнения в полосе шириной 500 км с пространственным разрешением 50 км.

2. *ATSR (Along Track Scanning Radiometer)* — пассивный радиометр ИК- и СВЧ-диапазонов, предназначенный для измерения температуры поверхности океана.
3. *MWR (Microwave Radiometer)* — СВЧ-радиометр, предназначенный для измерения интегрального содержания водного пара в столбе атмосферы и водозапаса облаков.
4. *RA (Radar Altimeter)* — альтиметр Ku-диапазона (13,8 ГГц), предназначенный для измерения уровня Мирового океана и топографических характеристик подстилающей поверхности.
5. *PRARE (Precise Range And Range-Rate Equipment)* — высокоточный радиодальномер, обеспечивающий точные траекторные измерения.

На ИСЗ *ERS-2* был установлен тот же набор сенсоров и добавился прибор для изучения озонового слоя *GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)* — спектрометр, работающий в видимом и УФ-диапазонах. Общий вид спутника *ERS-2* представлен на рис. 2.2.



Р и с. 2.2. Общий вид спутника ERS-2

Радиолокационные данные SAR ERS-2 высокого пространственного разрешения (12,5 м в точке, ширина полосы обзора 100 км) были получены нами в рамках научных проектов Европейского космического агентства, съёмка прибрежной акватории Чёрного моря проводилась целенаправленно под наш заказ. С 2009 г. до окончания функционирования спутника на орбите в сентябре 2011 г. радиолокационные данные ERS-2 предоставлялись в открытом доступе в оперативных архивах (срок хранения две недели) приёмных станций Matera (Италия) и Kiruna (Швеция). Пиксельное разрешение свободно распространяемых изображений составляло 75 м (Medium Resolution Image products, IMM), ширина полосы обзора — 100 км.

Радиолокаторы SAR ERS-1, -2 предоставляли информацию на вертикальной поляризации излучения и приёма и использовались нами в первую очередь для выявления плёночных загрязнений морской поверхности. На рис. 2.3 представлен фрагмент изображения SAR ERS-2, полученного 23 июня 2011 г. над акваторией Гданьского залива Балтийского моря.

Информация о параметрах радиолокаторов SAR ERS-1, -2 представлена в табл. 2.1.

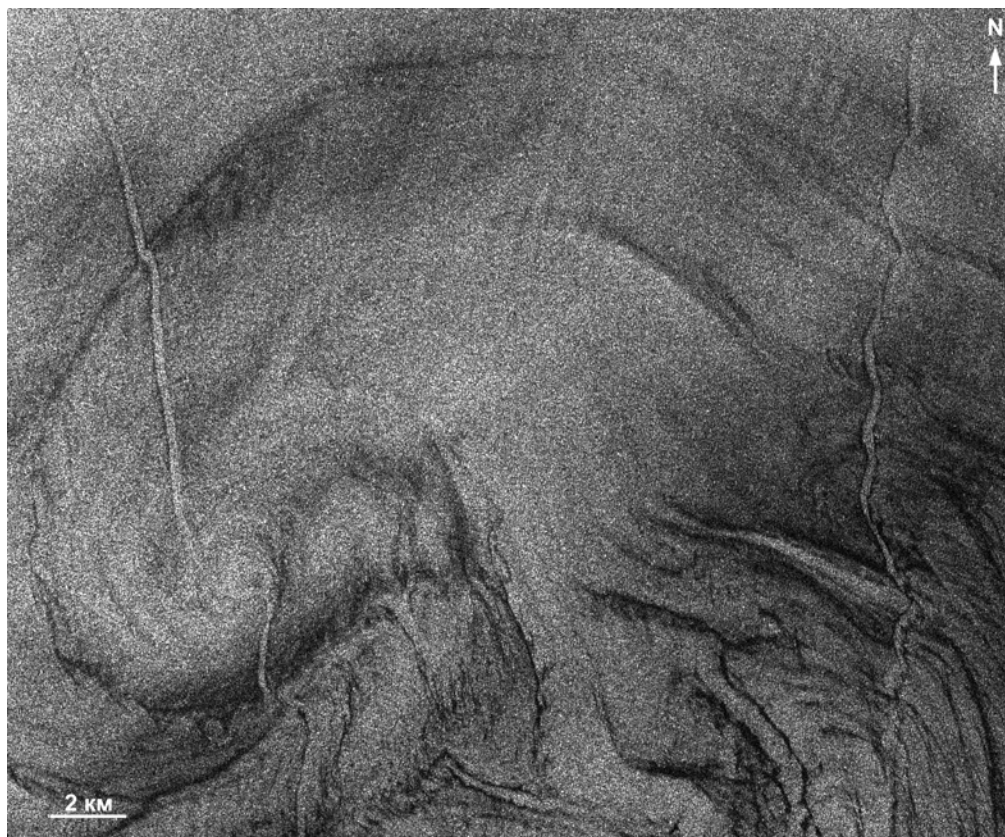


Рис. 2.3. Проявление вихревого диполя, биогенных slickов и корабельных следов на радиолокационном изображении SAR ERS-2 от 23 июня 2011 г. Фрагмент 27×22 км, разрешение в точке 12,5 м [Лаврова, Сабинин, 2016]

2.1.2. Искусственный спутник Земли Envisat

1 марта 2002 г. ЕКА в целях дальнейшего развития программы исследований земной поверхности, начатой спутниками *ERS*, был осуществлён запуск космического аппарата *Envisat* (*Environmental Satellite*). Была избрана солнечно-синхронная орбита со средней высотой 790 км, наклоном 98,55° и 35-дневным циклом точной повторяемости пролётов по своим трассам. В соответствии с программой миссии глобального мониторинга в целях изучения окружающей среды и безопасности (*GMES — Global Monitoring for Environment and Security*), на борту спутника были установлены различные приборы, работающие в широком диапазоне волн электромагнитного спектра — от микроволнового до ультрафиолетового — и предназначенные для мониторинга Мирового океана, льдов, суши и атмосферы. Спутник проработал на орбите десять лет, и закончил передавать информацию 8 апреля 2012 г. Полезная нагрузка КА *Envisat* включала в себя следующие сенсоры.

1. *ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar)* — усовершенствованный радиолокатор с синтезированной апертурой, позволяющий получать данные с пространственным разрешением от 30 до 150 м в полосе обзора от 56 до 400 км вне зависимости от облачности и условий освещённости. Применение фазированной антенной решётки позволяло проводить съёмку в интервале углов зондирования от 15 до 45°. Съёмка выполнялась в С-диапазоне длин волн (5,66 см) на пяти различных поляризациях (ВВ, ГГ, ВВ/ГГ, ГВ/ГГ, ВГ/ВВ).
2. *RA-2 (Radar Altimeter)* — радиолокационный высотомер, работающий в Ku- и S-диапазонах.
3. *MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)* — спектрометр среднего разрешения, фиксирующий солнечное излучение, отражённое подстилающей поверхностью в спектральном диапазоне от 390 до 1040 нм. Ширина полосы обзора составляла 1150 км.
4. *MWR (Microwave Radiometer)* — двухчастотный СВЧ-радиометр, предназначенный для измерения интегрального содержания водяного пара в атмосфере и содержания жидкой воды в облаках. Осуществлялось зондирование в надир на частотах 23,8 и 36,5 ГГц.
5. *MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)* — фурье-спектрометр среднего инфракрасного диапазона, работающий в интервале длин волн от 4,15 до 14,6 мкм. Прибор предназначен для анализа спектров излучения средней и верхней атмосферы и обнаружения газов, присутствующих в атмосфере в малых концентрациях.
6. *GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)* — спектрометр умеренного разрешения, работающий в диапазоне длин волн от 250 до 950 нм, предназначен для восстановления профиля содержания озона в стратосфере, кроме того, восстанавливает профили содержания окиси азота и водяного пара.
7. *SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartography)* — спектрометр, измеряющий спектры проходящего, рассеянного и отражённого в атмосфере солнечного излучения в диапазоне длин волн от 240 до 1700 нм. Прибор предназначен для измерения содержания газовых примесей в тропосфере и стратосфере. Высокое спектральное разрешение и широкий диапазон длин волн позволяет детектировать одновременно множество

различных примесей, даже если они присутствуют в низких концентрациях. Широкий диапазон длин волн также идеально подходит для обнаружения облаков и аэрозолей.

8. *AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer)* — прибор, измеряющий собственное и отражённое излучение подстилающей поверхности на следующих длинах волн: 0,55; 0,66; 0,87; 1,6; 3,7; 11 и 12 мкм. Прибор предназначен, в основном, для измерения температуры поверхности океана (ТПО) и имеет пространственное разрешение 1 км.
9. *DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)* — микроволновая следящая система, выполняющая задачу точного позиционирования спутника. Система представляет собой двухканальный приёмник (401,25 и 2036,25 МГц), сигнал которого принимает более пятидесяти следящих станций на Земле. Данная система обеспечивает всепогодное глобальное отслеживание положения спутника в пространстве, для точного определения орбиты и для расчёта точных поправок на влияние ионосферы на время запаздывания зондирующего и отражённого сигнала альтиметра.

Общий вид КА Envisat представлен на рис. 2.4.



Р и с. 2.4. Общий вид спутника Envisat

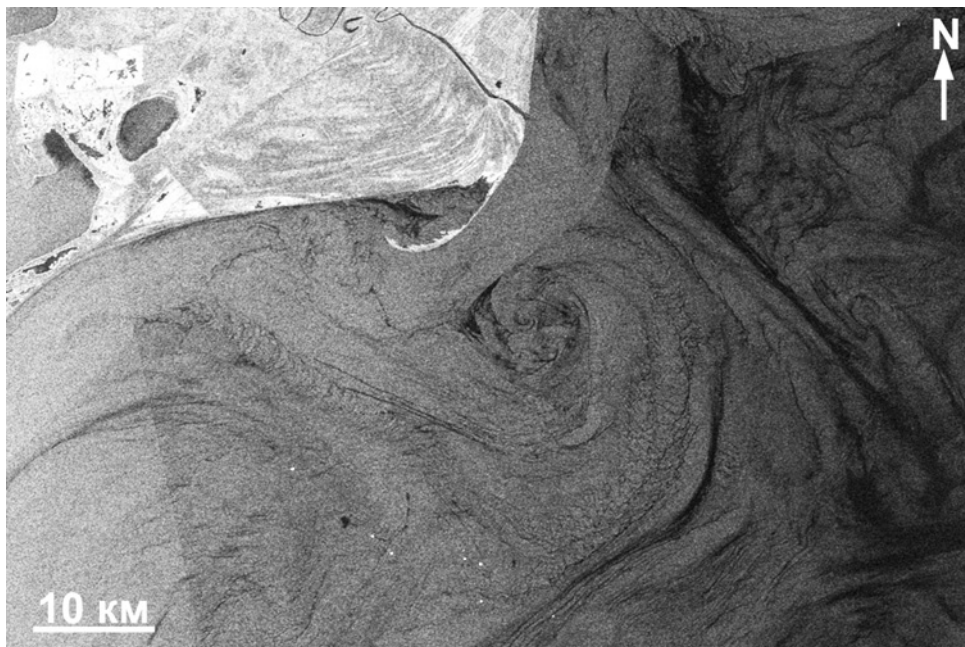


Рис. 2.5. Проявление субмезомасштабной динамики, биогенных slickов и нефтяных загрязнений на изображении ASAR Envisat от 17 июля 2011 г. Фрагмент 84×56 км, разрешение в точке 75 м, ГГ-поляризация

Данные *ASAR Envisat* являлись для нас основной базой для проведения мониторинга состояния и загрязнения различных акваторий: как морей, так и внутренних водоёмов. Наш архив изображений ASAR Envisat за период 2002–2012 гг. составляет более 15 тыс. сцен для различных районов Мирового океана. Данные ASAR Envisat, как и SAR ERS-2, были получены нами, как в рамках нескольких научных проектов ЕКА, так и из оперативных архивов открытого доступа приёмных станций ESRIN (Италия), Matera (Италия) и Kiruna (Швеция).

Для проведения широкого круга исследований использовались данные, полученные на ВВ- и ГГ-поляризациях, как высокого пространственного разрешения (12,5 м в точке), так и среднего (75 м в точке). Ширина полосы обзора составляла от 56 до 400 км.

На рис. 2.5 представлен фрагмент изображения ASAR Envisat, полученного в районе дельты Дуная 17 июля 2011 г. на ГГ-поляризации с разрешением в точке 75 м.

Информация о параметрах радиолокатора ASAR Envisat представлена в табл. 2.1.

Данные спектрометра *MERIS* использовались для изучения мезомасштабной и субмезомасштабной динамики вод, мониторинга интенсивного цветения фитопланктона и взвешенного вещества, выносимого реками или образованного в результате ветро-волнового перемешивания в прибрежной зоне. Строились цветосинтезированные изображения в естественных цветах (7-й, 5-й и 2-й каналы), а также карты общего содержания взвешенного вещества (TSM) и концентрации хлорофилла-а (*Chl a* concentration). На рис. 2.6 представлены примеры таких карт.

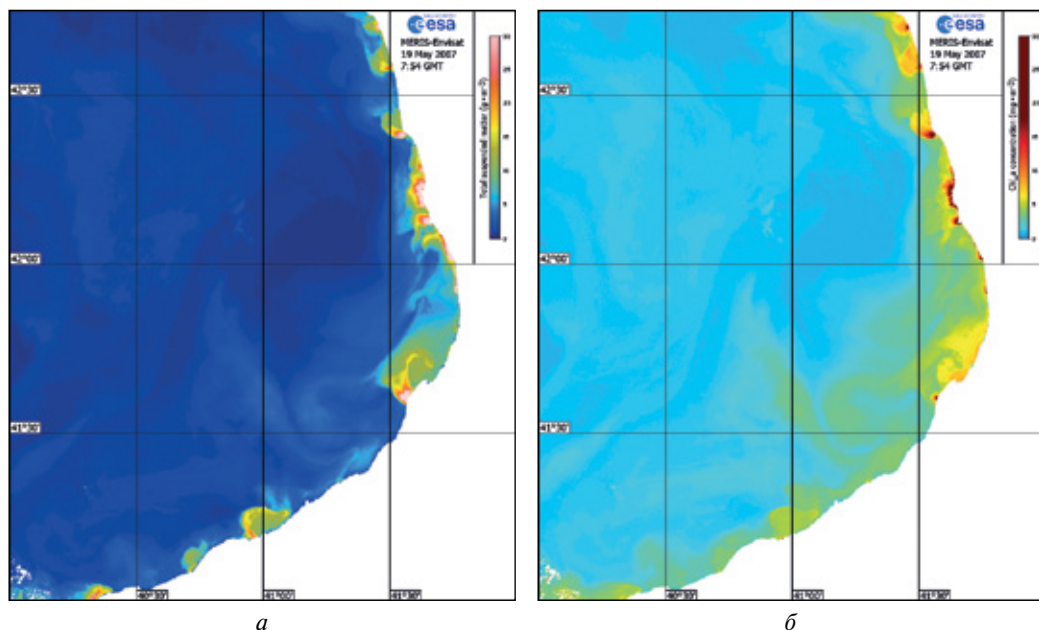


Рис. 2.6. Проявление выносов рек в восточной части Чёрного моря в данных MERIS Envisat от 19 мая 2007 г.: *а* — общее содержание взвешенного вещества; *б* — концентрация хлорофилла-*а*

2.1.3. Искусственные спутники Земли Radarsat-1, -2

Космический аппарат *Radarsat-1*, созданный под управлением Канадского космического агентства CSA (Canadian Space Agency) во взаимодействии с несколькими коммерческими структурами, является коммерческим космическим аппаратом. *Radarsat-1* оснащён РСА, выполняющим съёмку земной поверхности в С-диапазоне (длина волны 5,6 см), на горизонтальной поляризации излучения, в диапазоне углов зондирования от 10 до 59°. *Radarsat-1* был запущен 4 ноября 1995 г. с авиабазы Ванденберг на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 798 км и наклоном 98,6° с 24-дневным циклом точной повторяемости пролётов по своим трассам. При расчётном сроке эксплуатации пять лет аппарат *Radarsat-1* проработал на орбите почти 18 лет. Его миссия была признана завершённой 29 марта 2013 г.

В декабре 2007 г. с космодрома Байконур (Кызылординская обл., Казахстан) был запущен космический аппарат *Radarsat-2*, разработанный Канадским космическим агентством и компанией *MDA* (*MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.*). *Radarsat-2* также функционирует на солнечно-синхронной орбите идентичной орбите аппарата *Radarsat-1* и оснащён РСА, обладающим возможностями изменения ширины полосы съёмки и пространственного разрешения. Съёмка земной поверхности проводится в С-диапазоне длин волн (5,6 см) с изменяемой поляризацией излучения (ГГ, ВГ, ГВ, ВВ) в диапазоне съёмочных углов от 10 до 60°. Максимальное пространственное

разрешение в режиме *Ultra-Fine* составляет 3 м в полосе съёмки 20 км. По сравнению с предшествующим космическим аппаратом Radarsat-1, спутник Radarsat-2 имеет ряд существенных технических усовершенствований:

- установлен новый радар с активной фазированной антенной решёткой, обеспечивающий съёмку с пространственным разрешением до 1–3 м;
- реализован режим многополяризационной съёмки с сигналами двух или четырёх видов поляризации одновременно;
- обеспечена возможность съёмки районов с левой и с правой стороны относительно трассы полёта, что позволяет сократить время повторного просмотра;
- увеличена ёмкость бортового накопителя для выполнения глобальной съёмки;
- увеличена точность определения орбитального положения и ориентации спутника и, как следствие, более точной геопривязки изображений.

Общий вид ИСЗ *Radarsat-2* представлен на рис. 2.7.

Радиолокационные данные Radarsat-1, -2 были получены нами в рамках нескольких коммерческих проектов и российско-германского научного проекта “Detecting and Tracking Small Scale Eddies in the Black Sea and the Baltic Sea Using High-Resolution Radarsat-2 and TerraSAR-X Imagery” (SOAR Radarsat-2/TerraSAR-X Project#5074).



Р и с. 2.7. Общий вид ИСЗ Radarsat-2



Р и с. 2.8. Проявление нефтяного загрязнения, биогенных slickов и судов на радиолокационном изображении Radarsat-2, полученном в режиме Ultra-Fine 11 октября 2011 г. Фрагмент 11×5 км, пространственное разрешение 3 м, ВВ-поляризация

Радиолокационная съёмка с Radarsat-2, в частности, заказывалась нами для проведения синхронных подспутниковых измерений и изучения тонкой структуры прибрежных течений [Лаврова и др., 2012; Dreschler-Fischer et al., 2014].

На рис. 2.8 представлен фрагмент изображения Radarsat-2, полученного в районе Голубой бухты (Геленджик, Чёрное море) 11 октября 2011 г. на ВВ-поляризации с пространственным разрешением 3 м.

Информация о параметрах радиолокаторов Radarsat-1, -2 представлена в табл. 2.1.

2.1.4. Искусственные спутники Земли TerraSAR-X, TanDEM-X

Коммерческий спутник *TerraSAR-X*, разработанный Немецким аэрокосмическим центром (*DLR*) и компанией *EADS Astrium GmbH*, Германия, был запущен 15 июня 2007 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем «Днепр» и выведен на околополярную орбиту со средней высотой 514 км и наклоном 94,44°. Период точной повторяемости орбит составляет 11 сут. РСА, установленный на спутнике *TerraSAR-X*, позволяет изменять направление радиолокационного луча в диапазоне от 20 до 60°, причём это достигается не механическим движением антенны, а сложением множества отдельных лучей. Съёмка осуществляется в X-диапазоне при частоте зондирующего сигнала 9,65 ГГц и длине волны 3 см.

Радиолокационные изображения могут быть получены радиолокаторами ИСЗ *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* при трёх различных режимах съёмки:

- маршрутный (*StripMap mode, SM*) — разрешение по азимуту 3,3 м; ширина полосы обзора 30 км;

- прожекторный (Spotlight mode, SL) — разрешение по азимуту 1,7 м; ширина полосы обзора 10 км;
- прожекторный высокого разрешения (High Resolution Spotlight mode, HS) — разрешение по азимуту 1,1 м; ширина полосы обзора 5 км;
- сканирующий (ScanSAR mode, SC) — разрешение по азимуту 18,5 м; ширина полосы обзора 100 км.

Спутник TanDEM-X является точной копией спутника TerraSAR-X. Он был выведен на орбиту 21 июня 2010 г. украинно-российской конверсионной ракетой-носителем «Днепр». Целью программы TanDEM-X является проведение глобальной интерферометрической съёмки земной поверхности с использованием системы из двух радиолокационных космических аппаратов — основного КА TerraSAR-X и второго аналогичного КА TanDEM-X, расположенных на орбите с типичным расстоянием (интерферометрической базой) 250–500 м. Программа выполняется совместно DLR и EADS Astrium GmbH.

Общий вид тандема *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* представлен на рис. 2.9.

Радиолокационные данные TerraSAR-X и TanDEM-X были получены нами в рамках нескольких коммерческих проектов и российско-германского научного проекта “Detecting and Tracking Small Scale Eddies in the Black Sea and the Baltic Sea Using High-Resolution Radarsat-2 and TerraSAR-X Imagery” (SOAR Radarsat-2/TerraSAR-X Project #5074).

На рис. 2.10 представлен фрагмент изображения TanDEM-X, полученного в районе Геленджика (Чёрное море) 13 сентября 2013 г. на ВВ-поляризации с пространственным разрешением 3,3 м. Опыт использования радиолокационных изображений Radarsat-2, TerraSAR-X и TanDEM-X, получаемых в различных режимах и на различных поляризациях, для исследования океанических процессов обсуждается в статье [Лаврова и др., 2012]. Основные параметры TerraSAR-X и TanDEM-X представлены в табл. 2.1.

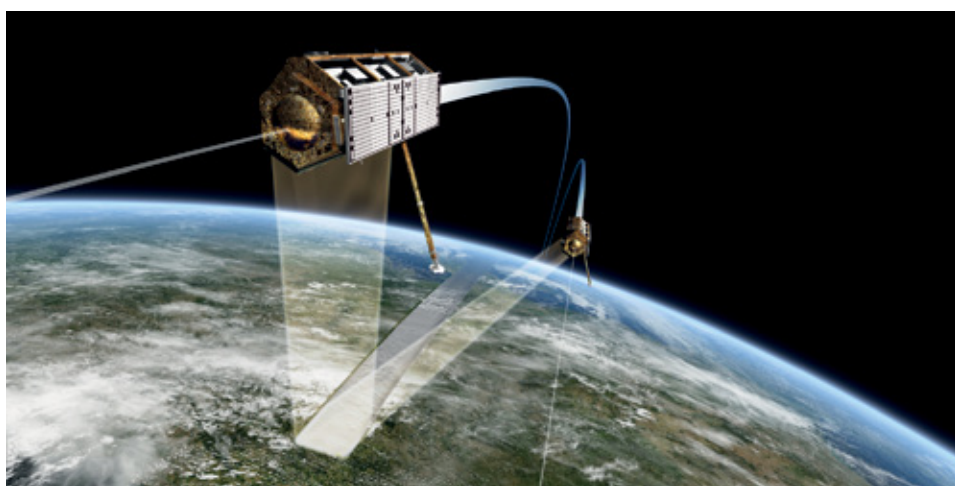


Рис. 2.9. Общий вид тандема TerraSAR-X и TanDEM-X

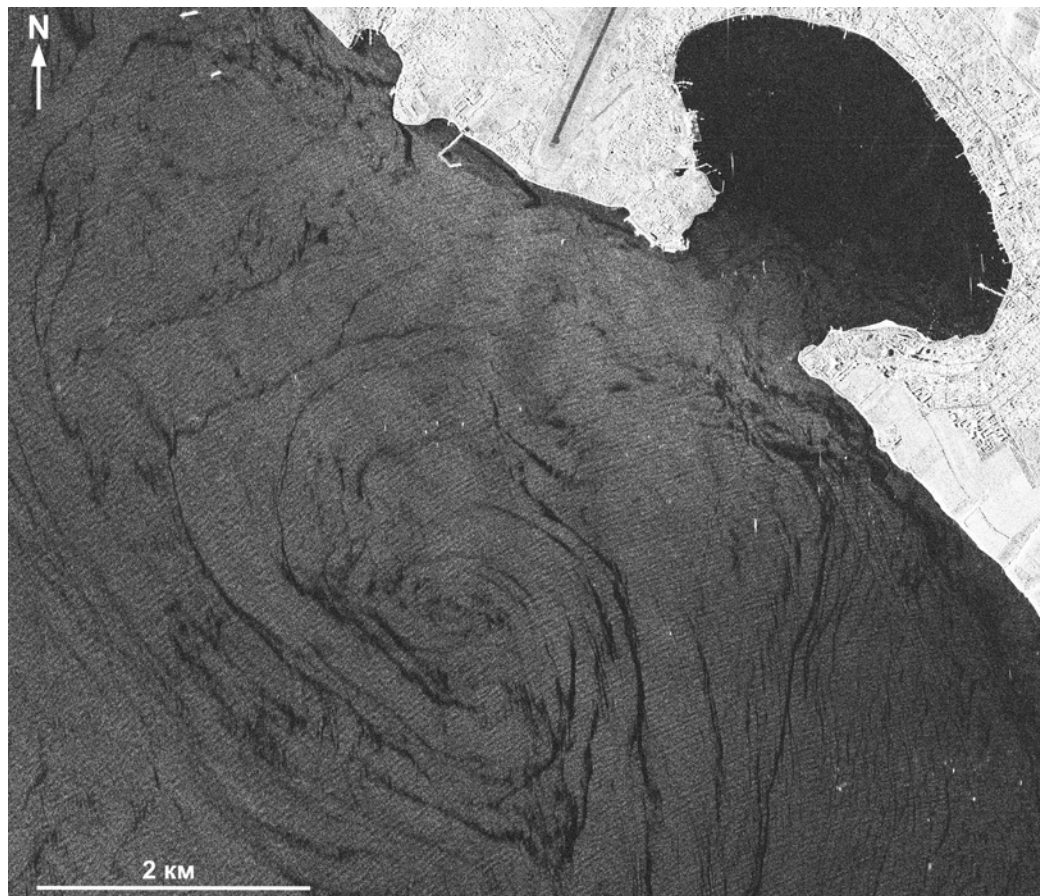


Рис. 2.10. Проявление циклонического вихря, биогенных slickов и судов на радиолокационном изображении TanDEM-X, полученном в режиме StripMap 13 сентября 2012 г. Фрагмент 8×7 км, пространственное разрешение 3,3 м; ВВ-поляризация

Подробное описание спутника TerraSAR-X приводится на сайте <http://www.intelligence-airbusds.com/en/228-terrasar-x-technical-documents>.

2.1.5. Искусственные спутники Земли серии Sentinel

Проект “Copernicus”, реализуемый Еврокомиссией совместно с Европейским космическим агентством, направлен на создание автономной многоуровневой системы наблюдения за экологической обстановкой на Земле. В рамках этого проекта предполагается иметь на орбите семь миссий спутников Sentinel (рис. 2.11). В настоящее время запущено четыре спутника: Sentinel-1A, Sentinel-1B; Sentinel-2A, Sentinel-3A. Подробная информация о технических характеристиках приборов, установленных на спутниках Sentinel, представлена на сайте Европейского космического агентства в разделе

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library>. Данные спутников серии Sentinel предоставляются в свободном доступе и могут быть скачаны на сайте Sentinels Scientific Data Hub» (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Sentinel-1A, -1B

Sentinel-1A — первый из семейства спутников, которые планируется запустить в рамках европейской программы Copernicus. Он был выведен на орбиту 3 апреля 2014 г. ракетой-носителем «Союз-СТА» с космодрома Куру во Французской Гвиане. На нём установлен радиолокатор с синтезированной апертурой С-диапазона длин волн с центральной частотой 5,405 ГГц (5,55 см). Миссия Sentinel-1 является продолжением программ ERS-2 и Envisat.

Съёмка производится на двойной поляризации ГГ/ГВ или ВВ/ВГ. Пространственное разрешение и ширина полосы обзора зависят от режима съёмки (табл. 2.2).

Т а б л и ц а 2.2. Параметры съёмки радиолокатором SAR-C Sentinel-1A, -1B

Режим	Номинальное пространственное разрешение, м	Ширина полосы обзора, км
Stripmap (SM; single-look)	5×5	80
Interferometric Wide Swath (IWS; single-look)	5×20	250
Interferometric Wide Swath (IWS; 3 looks)	25×80	250
Extra Wide Swath (EWS; single-look)	20×40	400
Wave mode (WM; single-look)	5×5	20×20 (каждые 100 км вдоль орбиты)



Р и с. 2.11. «Семейка» Sentinel (©ESA)



Р и с. 2.12. Общий вид ИСЗ Sentinel-1 (©ESA)



Р и с. 2.13. Проявление сликовых структур метановых сипов в районе грузинского континентального склона на радиолокационном изображении Sentinel-1В, полученном в режиме Interferometric Wide Swath 16 октября 2016 г. Фрагмент 22×13 км, разрешение в точке 10 м; ВВ-поляризация

Sentinel-1В был выведен на орбиту 26 апреля 2016 г. также ракетой-носителем «Союз-СТА» с космодрома Куру. На его борту установлен точно такой же радиолокатор. Группировка Sentinel-1 (рис. 2.12) обеспечивает съёмками всю территорию Европы, Канады, а также основные морские судоходные пути каждые 1–3 дня, независимо от погодных условий. С подробным описанием технических характеристик Sentinel-1А, -1В можно ознакомиться на сайте Европейского космического агентства <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>. Основные параметры представлены в табл. 2.1.

Радиолокационные данные Sentinel-1А, -1В являются для нас основой при проведении мониторинга плёночных загрязнений морской поверхности. На рис. 2.13 представлен фрагмент радиолокационного изображения Sentinel-1В, полученного 16 октября 2016 г. над восточной частью Чёрного моря.

Sentinel-2A

В настоящее время функционирует только первый из двух космических аппаратов — Sentinel-2А (рис. 2.14). Он был запущен 23 июня 2015 г. ракетой-носителем «Вега» с космодрома Куру. Спутник оснащён оптико-электронным мультиспектральным сенсором (MultiSpectral Instrument — MSI) для съёмки с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, и шириной полосы обзора 290 км. Орбита высотой в среднем 785 км, наличие в миссии двух спутников позволит проводить повторные съёмки каждые пять дней на экваторе и каждые 2-3 дня в средних широтах.



Р и с. 2.14. Общий вид ИСЗ Sentinel-2 (©ESA)

Таблица 2.3. Основные характеристики оптических сенсоров Sentinel-2 и Landsat-8

MSI Sentinel-2				OLI/TIRS Landsat-8				
Спектральный канал	Центральная длина волны, нм	Ширина спектрального канала, нм	Пространственное разрешение, м	Отношение сигнал/шум	Спектральный канал	Длина волны, нм	Пространственное разрешение, м	Отношение сигнал/шум
1	443	20	60	129	1	433–453	30	607
2	490	65	10	154	2	450–515	30	154
3	560	35	10	168	3	525–600	30	168
4	665	30	10	142	4	630–680	30	142
5	705	15	20	117	5	845–885	30	117
6	740	15	20	89	6	1560–1660	30	89
7	783	20	20	105	7	2100–2300	30	105
8	842	115	10	172	8	500–680	15	172
8a	865	20	20	72				72
9	945	20	60	114	9	1360–1380	30	114
10	1375	30	60	50	10	10602–11190	100 (30)	50
11	1610	90	20	100	11	11500–12511	100(30)	100
12	2190	180	20	100				100

С подробным описанием технических характеристик Sentinel-1A, -1B можно ознакомиться на сайте <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>.

Увеличение ширины полосы обзора наряду с высокой повторяемостью съёмки позволит отслеживать быстро изменяющиеся процессы. Уникальность миссии Sentinel-2 связана с сочетанием большого территориального охвата, частых повторных съёмок и, как следствие, систематическим получением полного покрытия всей Земли мультиспектральной съёмкой высокого разрешения. Миссия Sentinel-2 является продолжением программ SPOT и Landsat. В табл. 2.3 приведено сравнение характеристик сенсоров MSI Sentinel-2 и OLI/TIRS Landsat-8.

Данные MSI Sentinel-2A использовались нами для построения цветосинтезированных изображений высокого пространственного разрешения (10 м) в естественных цветах (каналы 4-й, 3-й, 2-й) для выявления районов интенсивного цветения водорослей, выносов реками мутных вод и т. д. На рис. 2.15 представлен фрагмент изображения MSI Sentinel-2A, полученного 7 августа 2015 г. в центральной части Балтийского моря.

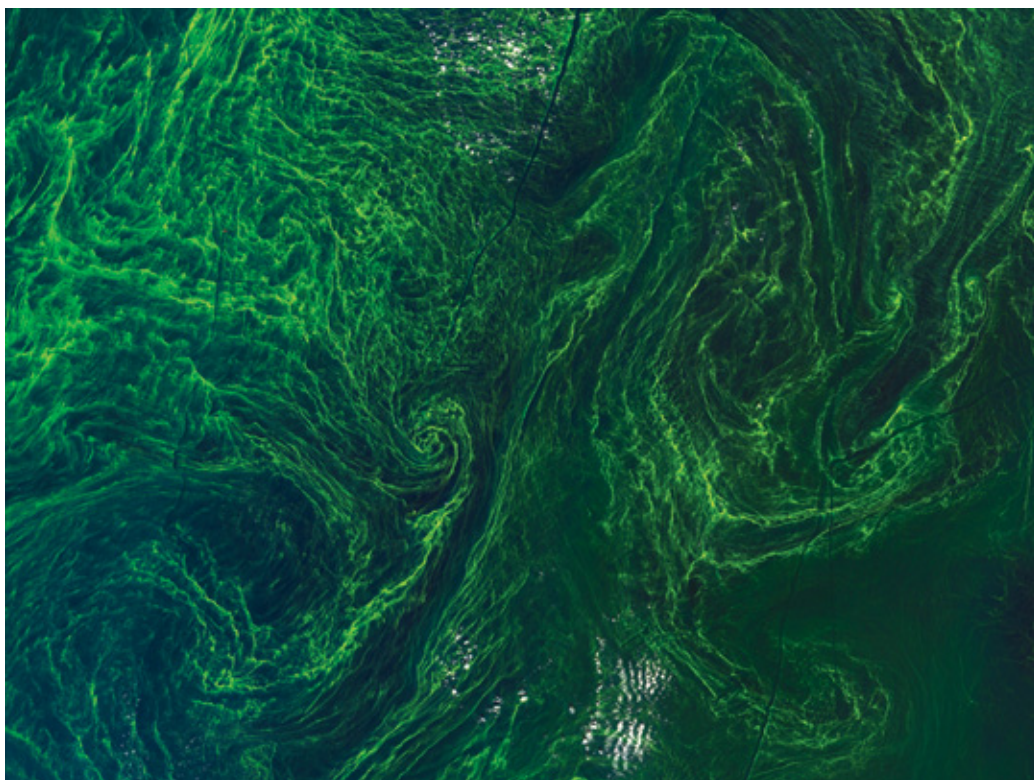


Рис. 2.15. Интенсивное цветение цианобактерий в Балтийском море. Фрагмент цветосинтезированного изображения, полученного MSI Sentinel-2A 7 августа 2015 г. с разрешением 10 м (©Copernicus Sentinel data (2015)/ESA)

Sentinel-3A

Основной целью миссии Sentinel-3 является наблюдение топографии поверхности океана, температуры поверхности моря и суши, цвета океана и суши с высокой степенью точности и надёжности для поддержки систем прогнозирования состояния океана, а также для мониторинга окружающей среды и климата. Первый из планируемой пары Sentinel-3A был выведен на орбиту ракетой-носителем «Рокот» с космодрома Плесецк 16 февраля 2016 г. Sentinel-3 — наследник хорошо себя зарекомендовавших спутников ERS-2 и Envisat. Его инновационное оборудование включает в себя следующие инструменты.

1. *SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer)* — аналог радиометра AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer), которым был оснащён спутник Envisat. Он измеряет температуру с точностью не хуже 0,30 К и имеет улучшенные характеристики по сравнению с AATSR, в том числе и по учёту атмосферной коррекции. Инструмент SLSTR проводит измерения в девяти спектральных каналах и двух дополнительных каналах, оптимизированных для мониторинга пожаров. Пространственное разрешение в видимой и инфракрасной коротковолновой зоне спектра — 500 м, а в тепловых инфракрасных каналах — 1 км.
2. *OLCI (Ocean and Land Colour Instrument)* — аналог спектрометра MERIS, которым был оснащён спутник Envisat. Число спектральных каналов в OLCI увеличено с 15 до 21, конструкция прибора оптимизирована для минимизации влияния солнечных лучей, пространственное разрешение — 300 м. OLCI — новое поколение инструментов для измерения параметров океанов и суши. Полосы охвата OLCI и SLSTR (в надире) полностью перекрываются. Прибор предназначен для биохимических измерений, для мониторинга, например, концентрации взвешенного вещества, *хлорофилла-а* и т. п.
3. *SRAL (Synthetic Aperture Radar Altimeter)* — двухчастотный (Ku- и C-диапазон) радар базируется на разработках для спутниковой системы CryoSat и обеспечивает измерения уровня океана с пространственным разрешением ~300 м в режиме SAR вдоль маршрута. Он способен поставлять точные данные о топографии поверхности океана, которые имеют существенное значение для океанографических задач и мониторинга климата. SRAL также осуществляет точные измерения топографии морского льда, ледовых щитов и т. д.

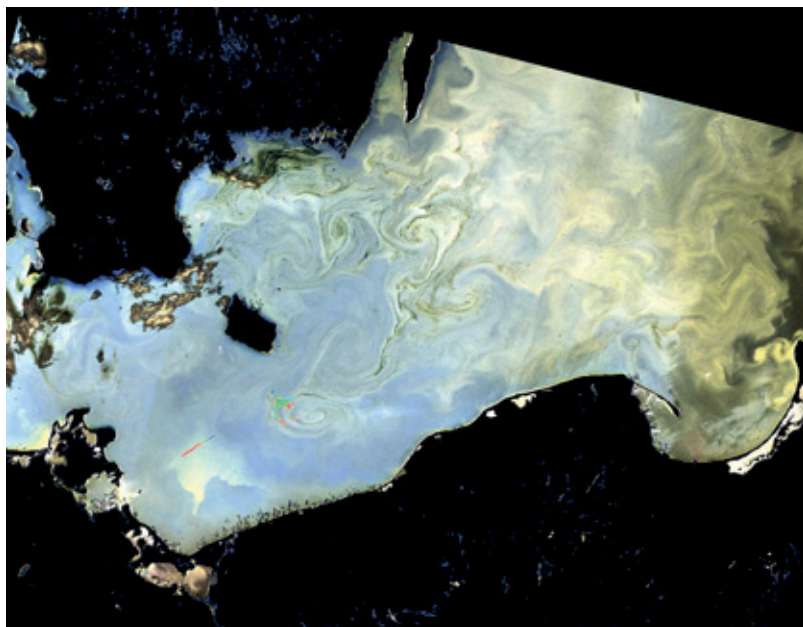
Спутник Sentinel-3B планируется запустить в 2018 г. Пара спутников Sentinel-3 будет иметь высокую повторяемость съёмки: менее двух дней для OLCI и менее одного дня для SLSTR на экваторе. Орбиты спутников (815 км) обеспечат получение полного пакета топографических данных каждые 27 дней.

Общий вид ИСЗ Sentinel-3 представлен на рис. 2.16.

На рис. 2.17 представлено модифицированное изображение OLCI Sentinel-3A, полученное 23 июня 2016 г. над Балтийским морем.



Р и с. 2.16. Общий вид ИСЗ Sentinel-3



Р и с. 2.17. Проявление вихревых структур в Балтийском море на модифицированном изображении OLCI Sentinel-3A от 23 июня 2016 г. Цветные полосы — температурные измерения с воздушного судна “The Zeppelin”, выполненные учёными из Helmholtz-Zentrum Geesthacht (Высшая школа Гельмгольца). (©Copernicus Sentinel data (2016)/HZG)

2.1.6. Искусственные спутники Земли серии Landsat

Американская программа Landsat — одна из наиболее продолжительных и успешных программ исследования Земли из космоса. С 1972 г. в рамках программы было запущено восемь спутников, один из запусков (Landsat-6) был неудачным. Хотя программа Landsat управлялась NASA, данные съёмки обрабатываются и распространяются Геологической службой США (USGS).

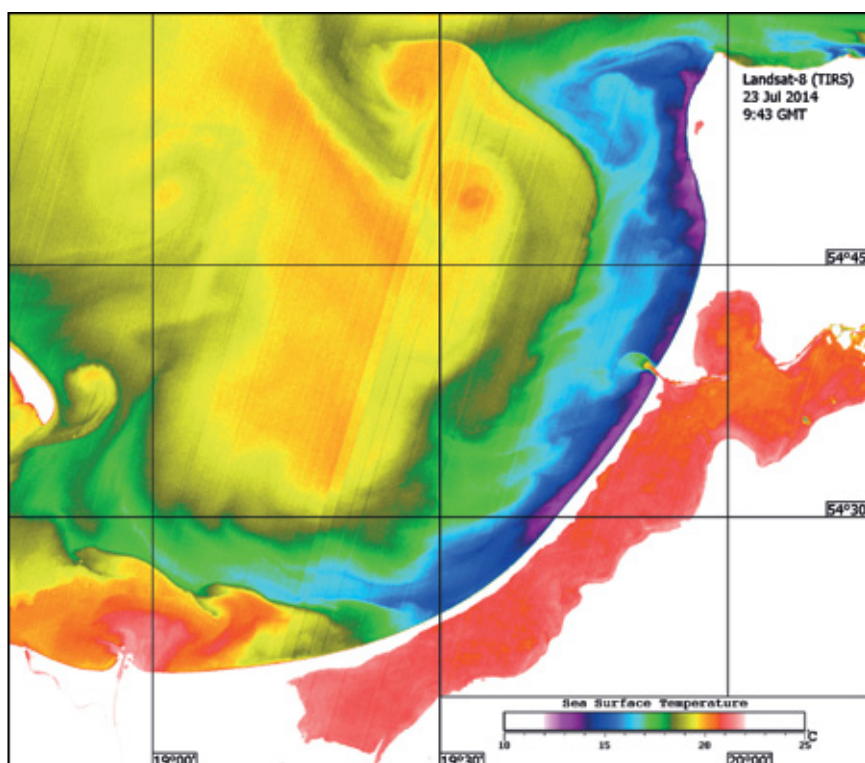
Все спутники Landsat выводились на субполярные солнечно-синхронные орбиты. Высота орбит первых трёх спутников составляла 900 км, период повторяемости съёмки равнялся 18 дням. Следующие спутники этой серии выводились на орбиты высотой 700 км с периодом повторной съёмки 16 дней. Спутники Landsat-3, -4, -5 были оснащены двумя типами сканеров, обеспечивающими съёмку земной поверхности с различным пространственным и спектральным разрешением — MSS (Multispectral Scanner) и TM (Thematic Mapper). Данные MSS (пространственное разрешение 80 м) доступны с 1972 г., данные TM (пространственное разрешение 30 м в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах, 120 м в тепловом диапазоне) — с 1982 г.

Сейчас на орбите функционируют только два спутника — Landsat-7 (запущен 15 апреля 1999 г.) и Landsat-8 (запущен 11 февраля 2013 г.), которые продолжают обеспечивать получение высококачественных изображений среднего разрешения поверхности Земли. Однако для проведения исследований, связанных с выявлением межгодовой изменчивости различных океанических процессов, нами активно используются и архивные данные Landsat-5 (спутник прекратил работу 21 декабря 2012 г.). Это позволяет расширить временной интервал исследований до 30 лет непрерывных наблюдений. На спутнике Landsat-5 было установлено два сенсора: MSS и TM, на КА Landsat-7 — радиометр ETM+, который является усовершенствованным вариантом сканеров TM. Существенное отличие прибора — наличие панхроматического канала высокого пространственного разрешения (15 м). 31 мая 2003 г. была зафиксирована поломка элемента SLC сенсора ETM+, обеспечивающего компенсацию движения спутника. Поэтому в результате зигзагообразной съёмки снимки аппарата Landsat-7 получаются в SLC-off-виде с дублированием линий, что в свою очередь увеличивает размер сцены и ухудшает её качество. Данный эффект практически сводится к минимуму в центральной части снимка. Качество в этой части изображения приближается к прежнему при SLC-on-режиме съёмки. В связи с возникшими проблемами была временно возобновлена оперативная эксплуатация спутника Landsat-5, который находится на орбите с 1984 г.

Спутник *Landsat-8* (рис. 2.18) продолжает получение данных для программы Landsat, используя два набора инструментов: *Operational Land Imager* (OLI) и *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS). Первый набор получает изображения в девяти диапазонах видимого света и ближнего ИК, второй набор — в двух диапазонах дальнего (теплого) ИК. Пространственное разрешение изображений зависит от канала: от 15 до 100 м (табл. 2.3). Спутник рассчитан на срок активного существования в пять лет, однако запас топлива позволяет использовать его до 10 лет. С подробной информацией о технических возможностях Landsat-8 можно ознакомиться на сайте <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>.



Р и с. 2.18. Общий вид ИСЗ Landsat-8



Р и с. 2.19. Проявление вихревого диполя, вытока реки Висла и выноса из Балтийского канала в поле температуры морской поверхности. ИК-изображение, полученное сенсором TIRS спутника Landsat-8 23 июля 2014 г.

Данные, как оперативные, так и архивные распространяются бесплатно. В частности их можно скачивать с сайта <http://glovis.usgs.gov/>.

Данные сенсоров спутников серии Landsat широко используются нами в исследованиях различных процессов в морских акваториях. Строятся как цветосинтезированные изображения различных каналов, так и карты температуры поверхности моря на основе данных TIRS Landsat-8. На рис. 2.19 приведён пример такой карты на 23 июля 2014 г., построенной для юго-восточной части Балтийского моря.

2.1.7. Искусственные спутники Земли Terra и Aqua

Космические аппараты Terra и Aqua являются частью комплексной программы NASA EOS (Earth Observing System), направленной на исследование Земли. В программу включены три специализированных спутника Terra, Aqua и Aura, предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно. Одним из ключевых инструментов американских спутников серии EOS является спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Сенсор MODIS, установленный на спутниках Terra и Aqua, имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах, и позволяет производить регулярную съёмку одной территории с пространственным разрешением до 250 м.

Искусственный спутник Земли Terra

Космический аппарат Terra был запущен NASA 18 декабря 1999 г. с авиабазы Ванденберг (США). Спутник находится на солнечно-синхронной полярной орбите высотой 705 км, наклонение — $98,2^\circ$. КА Terra пересекает экватор в 10:30 по местному времени, двигаясь с севера на юг.

На КА Terra установлены следующие приборы:

1. *MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)* — сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения, осуществляющий многоспектральную 36-канальную съёмку в диапазоне от 0,45 до 14,36 мкм с разрешением 250–1000 м.
2. *ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)* — усовершенствованный термально-оптический радиометр, осуществляющий 14-канальную съёмку в диапазоне от 0,52 до 11,65 мкм с разрешением 15–90 м и стереосъёмку в диапазоне 0,76–0,86 мкм. Зоны видимого и ближнего ИК-диапазона предназначены для измерения характеристик снежного покрова, воды, растительности и степени окисления поверхности объектов. Зоны среднего ИК-диапазона оптимальны для распознавания минералов, в особенности гидратированных минералов в глинистых почвах. Зоны теплового диапазона предназначены для регистрации температуры земной поверхности и дешифрирования основных типов горных пород.
3. *MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer)* — многоугловой сканирующий спектрорадиометр, позволяющий определять отражательные характеристики объектов в девяти разных направлениях. Четырёхзональная съёмка под

девятью углами наклона осуществляется в диапазоне от 0,42 до 0,87 мкм с разрешением от 250×275 до 1100×1100 м. Изменение отражения света при разных углах наблюдения позволяет распознавать различные типы атмосферных аэрозолей, форму облаков, покровы поверхности суши. При привлечении стереоскопических методов анализа изображений возможно наблюдение пространственных моделей местности и структур облачности.

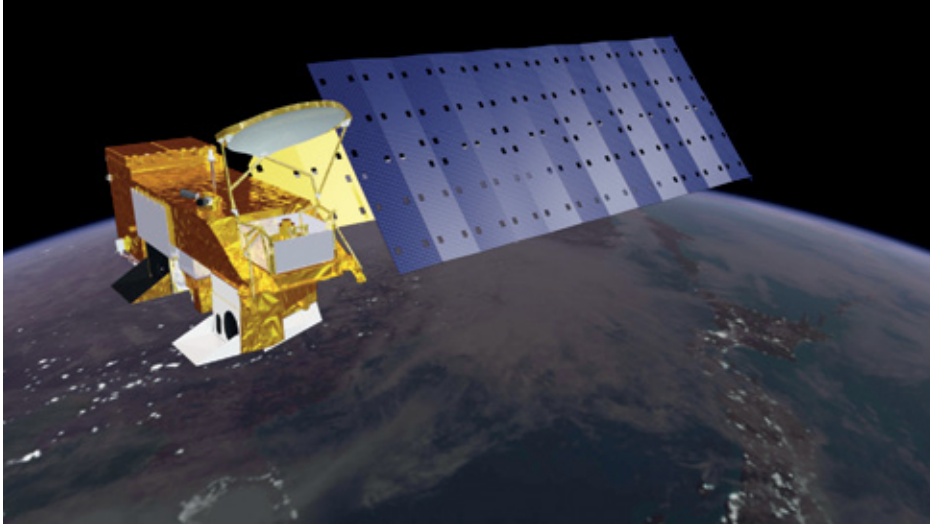
4. *CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)* — система изучения облачности и излучения Земли. Съёмочная система предназначена для изучения влияния облачного покрова на радиационный баланс Земли. Съёмка проводится в трёх широких спектральных зонах в диапазоне от 0,3 до более 100 мкм с разрешением от 20 км в надире. На борту спутника имеются два одинаковых прибора, которые измеряют суммарный радиационный баланс Земли и (совместно с данными MODIS по облачному покрову) обеспечивают оценку характеристик облачности, что позволяет оценить влияние облачности на тепловое излучение Земли. Один прибор работает в режиме поперечного сканирования, а второй вращается, выполняя сканирование по образующей конуса.
5. *MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere)* — четырёхканальный корреляционный спектрометр, предназначенный для измерения загрязнения в тропосфере. Позволяет определять на основе измерений характеристик уходящего инфракрасного излучения вертикальные профили окиси углерода и общее содержание метана в тропосфере. Измерения ведутся в трёх спектральных диапазонах 2,3; 2,4 и 4,7 мкм с пространственным разрешением 22 км в надире.

Искусственный спутник Земли Aqua

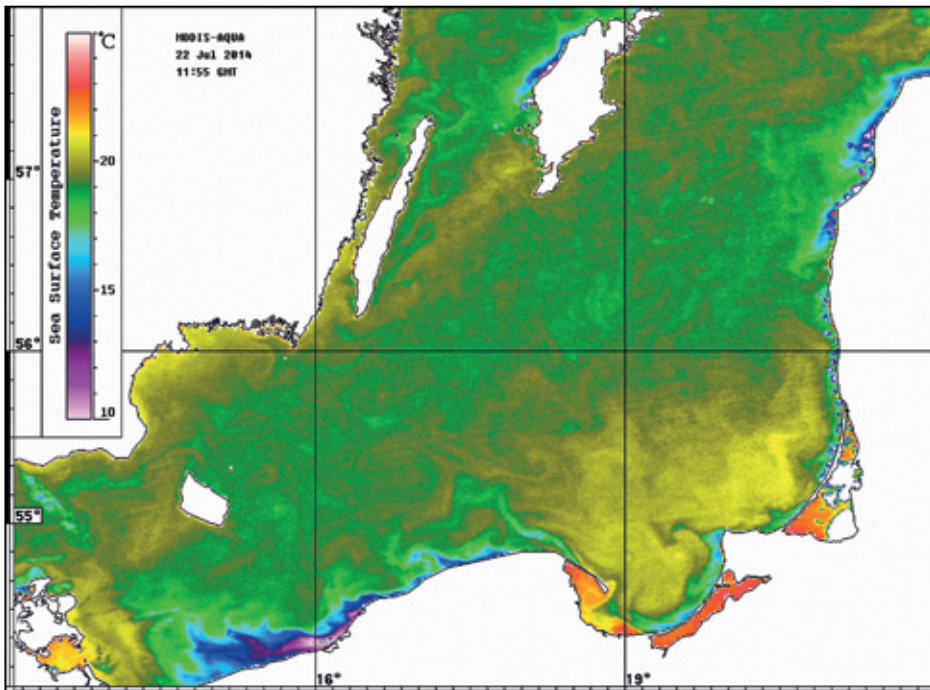
Космический аппарат Aqua (рис. 2.20) был запущен 4 мая 2002 г. с авиабазы Ванденберг (США). Спутник был выведен на околополярную солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км. На борту спутника Aqua установлены шесть научных инструментов, четыре из них изготовлены NASA, один — Японским космическим агентством NASDA и один — Бразильским институтом космических исследований. Приборы, установленные на КА Aqua, предназначены для изучения свойств облачного покрова и определения температуры воды в морях, а также для определения температуры атмосферы Земли и её влажности.

На КА Aqua установлены следующие приборы.

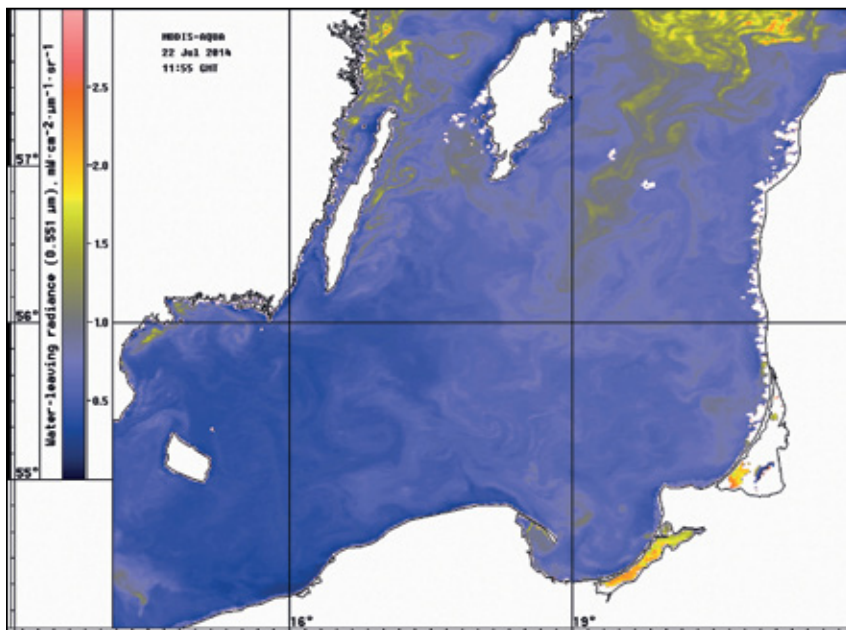
1. *MODIS* — см. ИСЗ Terra.
2. *AMSР-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer)* — усовершенствованный микроволновой сканирующий радиометр, имеющий 12 каналов и измеряющий яркостные температуры уходящего (микроволнового) излучения Земли на частотах 6,9; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5 и 89,0 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации в полосе шириной 1450 км. Позволяет получать регулярные данные о влагозапасе атмосферы, содержании водяного пара, водозапасе облаков, скорости приводного ветра, температуре поверхности океана, сплочённости ледяного покрова океана независимо от времени суток и состояния погоды.



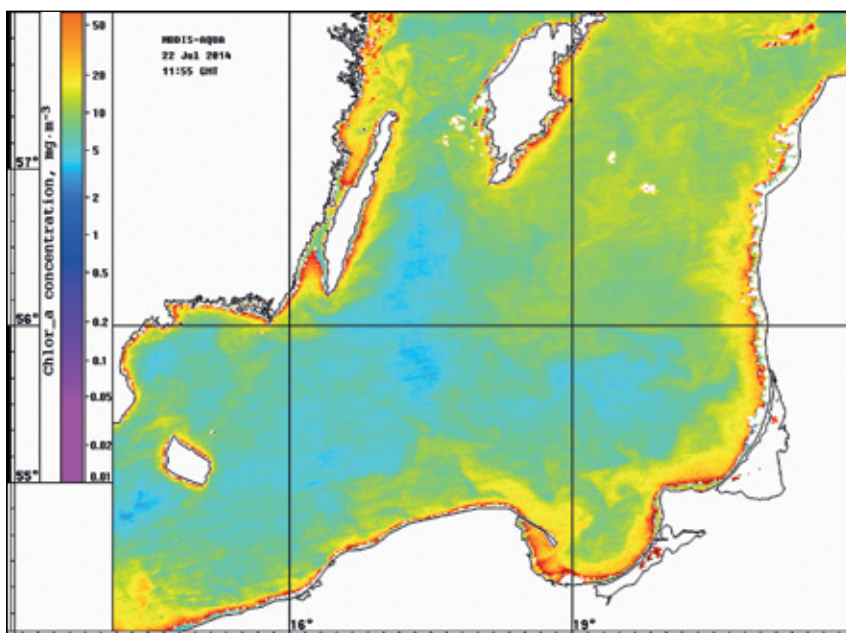
Р и с. 2.20. Общий вид ИСЗ Aqua



Р и с. 2.21а. Примеры карт, получаемых на основе данных сенсора MODIS спутника Aqua: температура поверхности моря



Р и с. 2.21.б Примеры карт, получаемых на основе данных сенсора MODIS спутника Аква: восходящее излучение



Р и с. 2.21.в. Примеры карт, получаемых на основе данных сенсора MODIS спутника Аква: концентрация хлорофилла-а

3. *AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A)* — многоканальный СВЧ-радиометр, имеющий 15 каналов в диапазоне от 1 до 15,89 ГГц. Предназначен для зондирования температуры подстилающей поверхности в любых погодных условиях.
4. *AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)* — прибор, измеряющий температуру и влажность атмосферы, температуру суши и морской поверхности.
5. *HSB (Humidity Sounder for Brazil)* — четырёхканальный микроволновый прибор, разработанный бразильскими специалистами для определения влажности в атмосфере. Закончил свою работу в феврале 2003 г.
6. *CERES* — см. ИСЗ Terra.

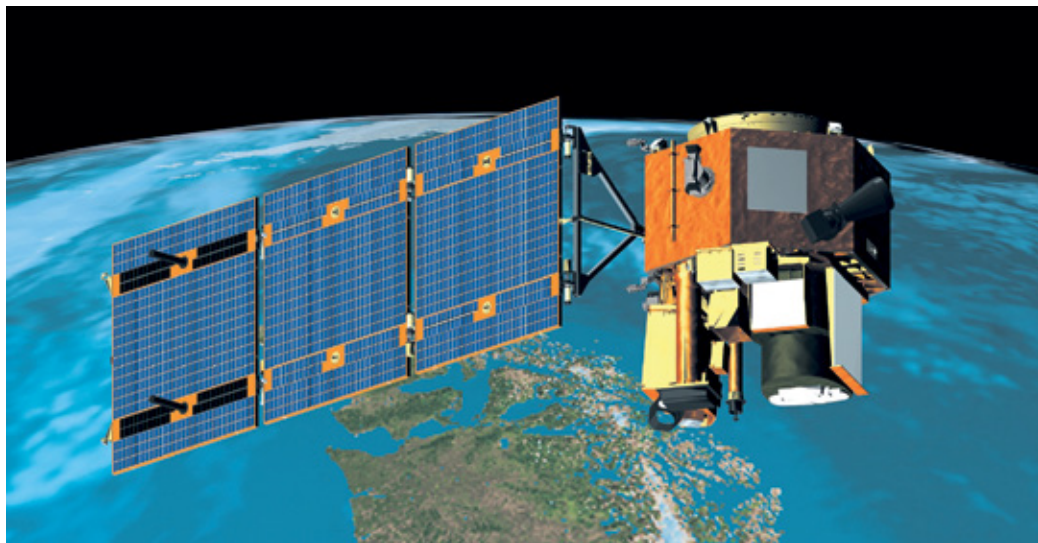
В своих исследованиях мы использовали, в первую очередь, данные MODIS Terra/Aqua, на основе которых строились цветосинтезированные изображения в естественных цветах (с разрешением 250 м), карты температуры морской поверхности (Sea Surface Temperature), восходящего излучения (Water Leaving Radiance), концентрации *хлорофилла-а* (*Chl-a Concentration*). На рис. 2.21 приведены примеры таких карт, построенных на основе данных MODIS Aqua, полученных 22 июля 2014 г. над Балтийским морем.

2.1.8. Гиперспектрометры спутникового базирования

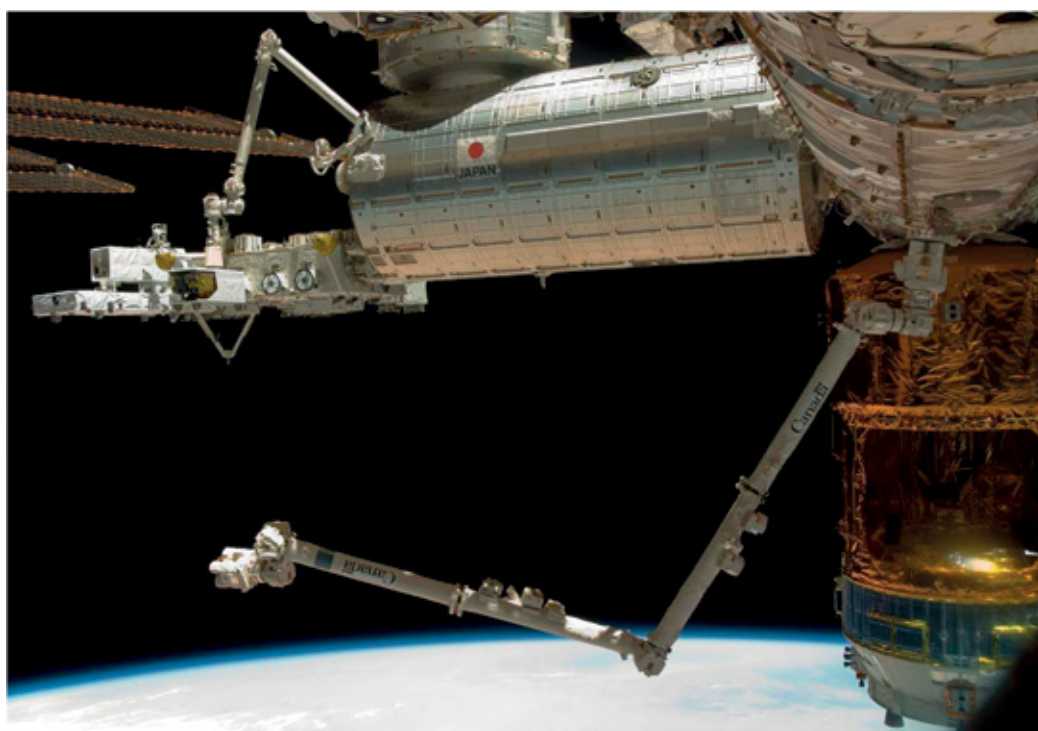
Гиперспектрометр Nuregion, установлен на спутнике EO-1, который был выведен на орбиту в 2000 г. (рис. 2.22). Данный сенсор предоставляет возможность получать информацию с 220 спектральных каналов в спектральном диапазоне 400–2500 нм (видимый и ближний ИК-диапазоны) со спектральным разрешением 10 нм и разрешением на местности 30 м при размерах сцены 7,5×100 км. Данные находятся в свободном доступе на сайте <http://glovis.usgs.gov/>.

Гиперспектрометр HICO был установлен в японском секторе международной космической станции (МКС) 10 сентября 2009 г. и проработал на орбите ровно пять лет до сентября 2014 г. (рис. 2.23). Прибор был разработан специально для наблюдения и изучения прибрежных зон морей и океанов и обладал высоким отношением сигнал/шум. Он позволял получать информацию со 102-х спектральных каналов в спектральном диапазоне 380–960 нм и обладал спектральным разрешением 5,7 нм с разрешением на местности 92 м при размерах сцены 42×190 км. Съёмки могли проводиться в широтных пределах примерно от 60° с. ш. до 60° ю. ш., что определялось геометрией полёта МКС. Подробная информация о технических характеристиках гиперспектрометра HICO представлена на сайте <http://hico.coas.oregonstate.edu/>.

Съёмка сенсором HICO осуществлялась по нашему заказу над следующими акваториями Чёрного моря: Керченский пролив, район распространения вод Дуная, экватори, в районе Новороссийска-Геленджика. Данные сенсоров Nuregion и HICO использовались для восстановления параметров водной среды, такие как: оценка глубины прибрежных вод, их прозрачности, определение состава органических и неорганических веществ, растворённых и взвешенных в воде, характеристик дна.



Р и с. 2.22. Общий вид ИСЗ EO-2, на котором установлен гиперспектрометр Hyperion



Р и с. 2.23. Общий вид японского сектора МКС с установленным на нём гиперспектрометром HICO



Рис. 2.24. Проявление вихревых структур на цветосинтезированном изображении гиперспектрометра HICO, полученном 10 ноября 2013 г. над северо-восточной частью Чёрного моря. Спектральные каналы: красный — 0,512 мкм (32); зелёный — 0,536 мкм (24); синий — 0,467 мкм (12)

Основное внимание уделялось разработке алгоритмов различения загрязнений морской среды различного происхождения на основе гиперспектральных данных [Лаврова и др., 2014б; Уваров и др., 2014]. На рис. 2.24 представлен фрагмент цветосинтезированного изображения HICO, полученного 10 ноября 2013 г. мористее Цемесской бухты (северо-восточная часть Чёрного моря).

2.2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ И АРХИВЫ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Выше было показано, что количество спутниковых средств наблюдения, ориентированных на изучение Мирового океана, быстро увеличивается. На данный момент накоплены большие архивы данных дистанционного зондирования Мирового океана, и на их основе производится большое количество разнообразных информационных продуктов. Политика многих космических агентств направлена на то, чтобы сделать доступной спутниковую информацию для как можно большего круга пользователей.

Европейское космическое агентство в связи с началом функционирования программы Sentinel впервые открыло свободный доступ ко всей исходной спутниковой информации, как оперативной, так и архивной, получаемой приборами, установленными на спутниках семейства Sentinel. В настоящее время данные Sentinel-1A, -1B, Sentinel-2A можно бесплатно скачивать с сайта Sentinels Scientific Data Hub (Scihub) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). В ближайшее время на этом сайте станут доступны данные сенсора OLCI, установленного на космическом аппарате Sentinel-3. На рис. 2.25 представлен интерфейс Scihub с выборкой данных Sentinel-1A за период 22–25 октября 2016 г. для Юго-Восточной Балтики.

С июля 2016 г. ЕКА пересмотрело свою политику в отношении архивных данных ASAR Envisat. Данные высокого разрешения, полученные в Image Mode (IMP) и Alternating Polarisation (APP), можно теперь заказывать для скачивания через EOLI-SA-интерфейс (<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.htm>).

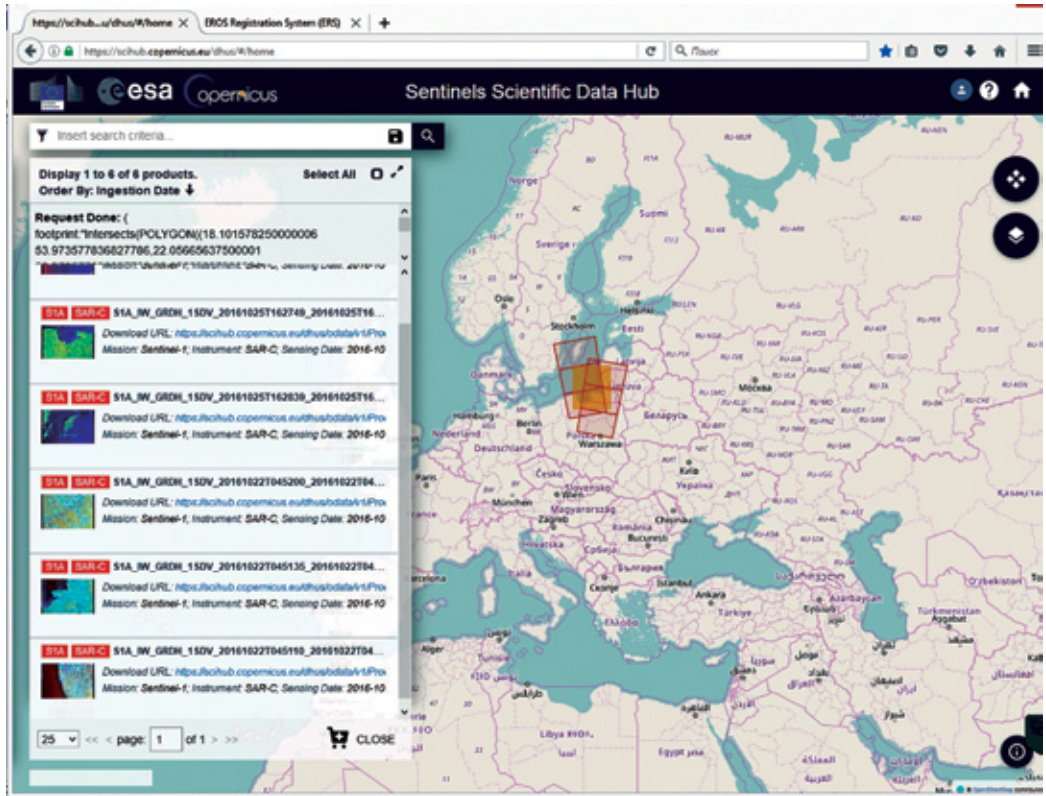


Рис. 2.25. Общий вид интерфейса Sentinel Scientific Data Hub с выборкой данных Sentinel-1A в режиме IW_GRDH за период 22–25 октября 2016 г. для Юго-Восточной Балтики

В режиме «на лету» (“On the Fly”) пользователь может сгенерировать продукт уровня 1 (ASAR Level 1) напрямую из исходных архивных данных (Level 0 data archive product) и скачать его с помощью EOLI-SA интерфейса. Данные SAR ERS-1/2 станут доступными в режиме “On the Fly” в первом квартале 2017 г.

Архивные данные MERIS Envisat полного разрешения (MERIS FRS), как первого уровня (Level-1), так и продукты, построенные на их основе (Level-2), полученные в период с 17 мая 2002 г. по 8 апреля 2012 г., находятся в свободном доступе на сайте <http://merisfrs-merci-ds.esa.int/merci>. Для получения логина и пароля для входа на сайт данных MERIS Envisat необходимо заполнить формы, представленные на сайте <https://earth.esa.int/web/guest/pi-community/apply-for-data>. Список продуктов Level-2 и подробное описание алгоритмов их построения представлены на сайте <https://earth.esa.int/handbooks/meris/CNTR2-7.html>.

Архивные данные полного разрешения сенсоров спутников серии Landsat практически за все года наблюдений, а также оперативные данные ETM+ Landsat-7 и OLI/TIRS Landsat-8 находятся в свободном доступе на сайте Геологической службы США (USGS — United States Geological Survey) <http://landsat.usgs.gov/index.php>. Существуют два подхода к получению данных Landsat из архива USGS: с использованием

web-приложения GloVis и web-приложения EarthExplorer. Помимо данных Landsat на сайте <http://glovis.usgs.gov/> представлены данные спутника EO-1 приборов ALI (Advanced Land Imager) и гиперспектрометра Hyperion, спектральные характеристики которого описаны в п. 2.1.8. Вид интерфейса GloVis с выбранным кадром OLI Landsat-8 для юго-восточной части Балтийского моря за 21 июля 2016 г. представлен на рис. 2.26.

Одной из наиболее полных и удобных для пользователя информационных систем, предоставляющих в свободном доступе спутниковые данные и продукты, полученные на их основе, является система Ocean Color Data (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>), созданная и поддерживаемая National Aeronautics and Space Administration США (NASA). Данная информационная система позволяет получать информацию о температуре поверхности воды, концентрации хлорофилла и о многих других параметрах воды за разные периоды времени (дни, месяцы, годы), исследовать тренды, сравнивать информацию, полученную с различных спутников. На рис. 2.27 представлена одна из страниц интерфейса Ocean Color Web, на которой можно осуществлять выбор продуктов, созданных на основе данных перечисленных приборов (SeaWiFS, MODIS, MERIS и т. д.) для конкретного района, за конкретный период.

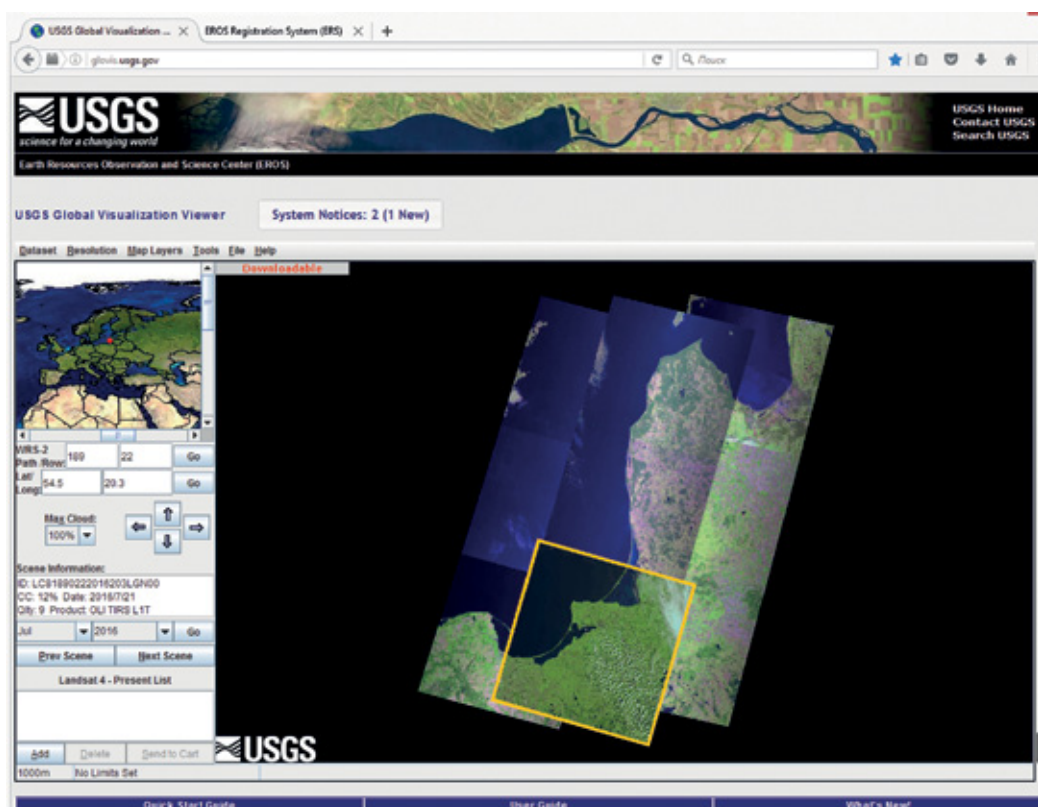


Рис. 2.26. Общий вид интерфейса GloVis с выбранным кадром OLI Landsat-8 для юго-восточной части Балтийского моря за 21 июля 2016 г.

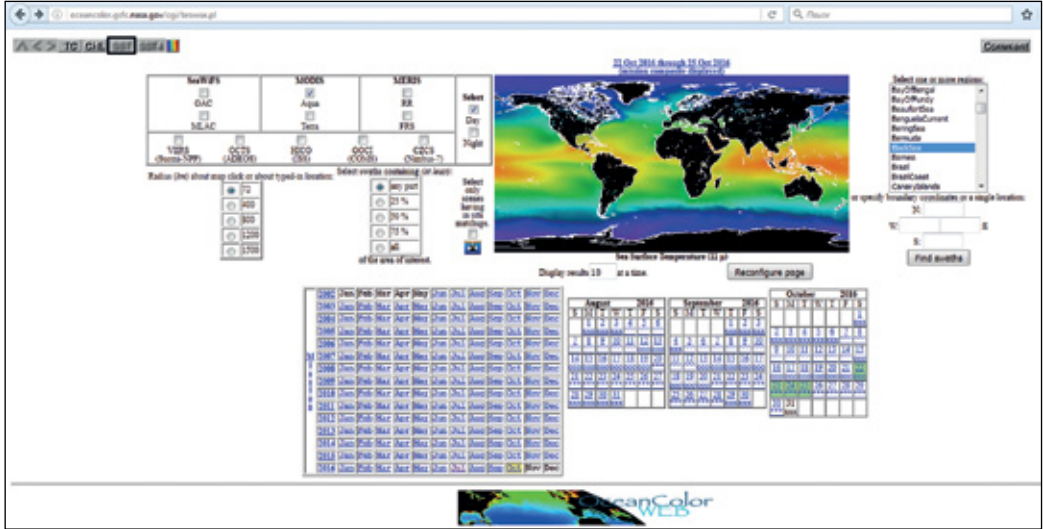


Рис. 2.27. Страница выбора данных в информационной системе Ocean Color Web. Для примера на основе данных сенсора MODIS спутника Аква построена карта средней температуры поверхности моря за период 22–25 октября 2016 г.

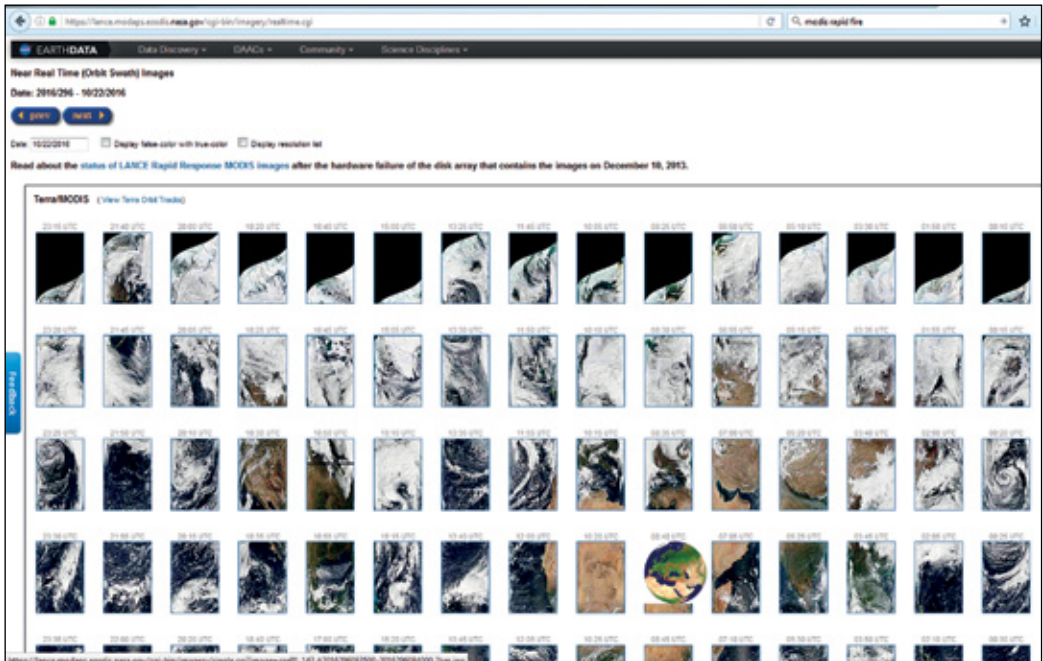


Рис. 2.28. Фрагмент страницы информационной системы LANCE Rapid Response MODIS images для выбора данных сенсора MODIS спутника Терра за 22 октября 2016 г.

Для оперативного просмотра цветосинтезированных данных MODIS Terra/Aqua удобно использовать информационную систему LANCE Rapid Response MODIS images (<https://lance.modaps.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/realtime.cgi>), позволяющую получать True Color («истинный цвет») изображение, а также композиции 7-2-1 и 3-6-7 каналов с различным пространственным разрешением от 250 м до 4 км. Фрагмент страницы за 22 октября 2016 г. представлен за рис. 2.28. Для отдельных районов, список которых можно найти на сайте <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/rapid-response/modis-subsets>, имеется возможность получать в оперативном режиме «склеенные» изображения, охватывающие весь район наблюдения.

Информацию о других архивах спутниковых данных можно найти, например, в лекции, прочитанной Станичным С. В. на Школе молодых учёных в Институте космических исследований РАН в рамках конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (http://d33.infospace.ru/d33_conf/2010_conf_pdf/school/stanichni.pdf).

Однако упомянутые выше системы обеспечивают только доступ к каталогам спутниковых данных, причём доступ к данным различных сенсоров или информационным продуктам, созданным на их основе, организован совершенно независимо. Процедуры совместной обработки и анализа разнородных данных дистанционного зондирования Земли, необходимые при проведении многосенсорного мониторинга, комплексных экспериментов и научных исследований, не предусмотрены. Поэтому в ИКИ РАН был разработан специализированный информационный сервис “See The Sea”, позволяющий эффективно получать, обрабатывать и анализировать разнородные спутниковые данные.

2.3. СПУТНИКОВЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ СЕРВИС “SEE THE SEA”

Следует отметить, что успешное решение многих задач, связанных с исследованиями Мирового океана на основе данных спутниковых наблюдений, во многом зависит от построения систем, которые обеспечивают быстрый доступ к данным и возможность совместного анализа различных продуктов обработки спутниковых данных. При этом для многих задач особенно интересна организация возможности совместного анализа данных наблюдений в различных диапазонах (видимом, инфракрасном, микроволновом, СВЧ), с различным пространственным разрешением, которые получаются приборами, установленными на различных спутниковых системах.

Благодаря фактически взрывному росту объёмов информации о Мировом океане, получаемой на основе данных дистанционного зондирования, эффективная работа с этой информацией, в том числе её комплексный анализ, становятся возможными только посредством использования специально разработанных систем и технологий, позволяющих оперировать с большими, постоянно пополняющимися архивами данных. Подобные технологии активно развиваются [Лурия и др., 2004, 2011] и позволяют реализовать совершенно новые подходы работы с данными дистанционного зондирования. В частности, на основе подобных технологий создаются системы,

использующие активные архивы. В такие архивы фактически интегрированы специальные инструменты (интерфейсы работы с данными), которые дают возможность не только быстро найти и выбрать необходимые для решения конкретных задач наборы данных, но и сразу провести их обработку и анализ. Это предоставляет учёным и специалистам, занимающимся изучением и мониторингом морей и океанов, совершенно новые инструменты для работы с данными дистанционных наблюдений. Естественно, что для того, чтобы подобные системы оказались достаточно эффективными, они должны быть ориентированы на решение определённого класса задач. Это позволяет оптимизировать как набор используемой информации, так и методы её обработки, анализа и представления.

Примером такого спутникового информационного сервиса может служить геопортал “See The Sea” (STS), который создан и находится в опытной эксплуатации в Институте космических исследований Российской академии наук [Лупян и др., 2012]. Основой при создании системы STS стала технология GEOSMIS, разработанная в ИКИ РАН и хорошо зарекомендовавшая себя при построении систем работы с данными в различных научных и прикладных проектах, выполняемых в институте [Толпин и др., 2011]. Ниже будет приведено более подробное описание задач, основных возможностей и функций основных подсистем STS.

Спутниковый сервис STS призван обеспечить специалистам, работающим в области исследования Мирового океана, удобные инструменты не только для доступа к спутниковым данным и различным информационным продуктам, полученным на основе их обработки, но и для проведения различных видов специализированного анализа информации. При этом обеспечивается возможность проведения комплексного анализа данных, различных по своей физической природе, пространственному разрешению, размерности и времени получения. На основе комплексного анализа разнородных данных появляется возможность более глубокого изучения и всестороннего описания явлений и процессов в Мировом океане, которые определяются сложными механизмами взаимодействия гидродинамических, метеорологических и биологических факторов. Следует отметить, что для многих задач, связанных с интерпретацией спутниковых наблюдений, желательно иметь возможность совместного анализа данных дистанционного зондирования и сопутствующей информации (например, метеорологической). Поэтому любая современная система, обеспечивающая работу с данными наблюдений о состоянии окружающей среды, должна обладать также возможностями оперирования с различными видами информации.

В настоящее время спутниковый сервис STS ориентирован на работу со следующими основными типами спутниковых данных и результатов их обработки:

Радиолокационные данные применяются в настоящее время для изучения широкого класса процессов и явлений, проявляющихся на морской поверхности посредством модуляции гравитационно-капиллярной составляющей спектра поверхностного волнения и протекающих в океане и атмосфере над ним. Система STS обеспечивает возможность работы с архивными данными сенсоров SAR ERS-1, -2, и ASAR Envisat, архив которых ведётся в ИКИ РАН с 1999 г. В этих архивах накоплено более 30 000 сцен в основном по акватории Чёрного, Балтийского, Каспийского морей и морей российской Арктики. Следует отметить, что это один из немногих существующих архивов, содержащих такой объём данных спутниковой радиолокации по акватории-

ям этих морей. Начиная с момента введения в действие спутников Sentinel-1A, -B, оборудованных радиолокаторами с синтезированной апертурой, налажены получение и обработка поступающих с них данных, которые распространяются Европейским космическим агентством <https://scihub.copernicus.eu/>.

Данные метеорологических спутниковых систем обеспечивают наблюдения в основном в видимом и инфракрасном диапазонах. Этот вид данных используется для оценки различных характеристик морской поверхности. По ним, например, определяется цветность моря, определяется температура морской поверхности, оценивается ледовая обстановка, восстанавливаются характеристики течений и вихревых структур и т.д. Система STS обеспечивает возможность работы с новыми и архивными данными сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra, MERIS ИСЗ Envisat и AVHRR ИСЗ NOAA видимого и инфракрасного диапазонов. Данные этих сенсоров накоплены в архивах ИКИ РАН за различные сроки, начиная с 2000 г. по акваториям пограничных морей России. В настоящее время в архивах, с которыми оперирует STS, имеются десятки тысяч спутниковых снимков.

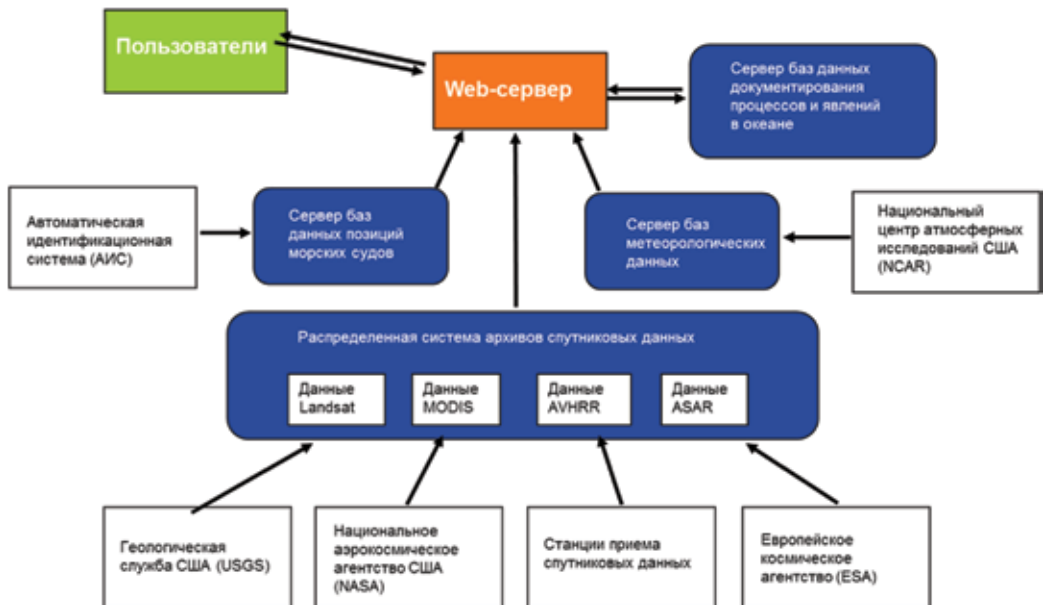
Данные природоресурсных спутниковых систем обеспечивают наблюдения в видимой и инфракрасной областях спектра с достаточно высоким пространственным разрешением (несколько десятков метров). Эти данные используются для детального анализа различных морских процессов. Система STS обеспечивает возможность работы с данными сканирующих радиометров Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI. В ИКИ РАН накоплены архивы этих данных по акваториям пограничных морей России, в настоящее время они уже интегрированы в спутниковый сервис STS. В систему STS поступают данные прибора MSI со спутника Sentinel-2A начиная с августа 2015 г. Это позволяет специалистам, использующим сервис, работать с несколькими десятками тысяч спутниковых изображений.

Метеорологические данные. Как мы уже отмечали, для комплексного анализа различных данных в системе должна иметься возможность работы и с метеорологической информацией. В настоящее время в STS используются архивы метеоинформации, созданные в ИКИ РАН на основе данных, поступающих из Национального центра атмосферных исследований США (NCAR) (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds094.0/>). Эти данные получены с помощью модели NCEP Climate Forecast System Version 2 и представлены на основе регулярной сетки с шагом $0,5^\circ$ и временным разрешением 6 ч. Для архивных данных спутниковый сервис STS в настоящее время обеспечивает возможность работы со следующим набором метеорологических параметров: температура воздуха (средняя за период, минимальная и максимальная), количество осадков, относительная влажность, атмосферное давление, облачность, нисходящие и восходящие потоки солнечной радиации, скорость и направление ветра.

Картографическая информация (карты глубин, береговые линии, населённые пункты и реки находящиеся в береговой зоне и т.д.) также интегрирована в спутниковый сервис и используется при анализе различных процессов происходящих в приграничных морях России.

Дополнительные наборы данных. Спутниковый сервис STS изначально строился как открытая система, которая позволяет интегрировать в себя дополнительные наборы данных. При появлении новых спутниковых систем наблюдения, система будет просто расширяться. Например, в ближайшее время планируется интегрировать в неё данные со спутника NPP, серии нового поколения метеорологических спутников наблюдений (http://jointmission.gsfc.nasa.gov/spacecraft_inst.html). Кроме того, в систему планируется постепенно включать новые виды информации, например: данные буёв системы ARGO, данные из интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА) и данные о позициях судов, получаемые на основе системы автоматической идентификации судов (AIS). Кроме того, в спутниковом сервисе STS имеется возможность оперативно получать доступ к информации из внешних источников на уровне интерфейсов работы с данными.

Особо следует отметить, что имеющиеся на сегодня архивы данных в спутниковом сервисе STS постоянно автоматически пополняются. При этом в системе организовано автоматическое поступление информации из различных российских и зарубежных центров сбора и обработки данных. Схема организации поступления данных в спутниковый сервис STS представлена на рис. 2.29. Все поступающие в систему данные проходят автоматическую обработку и помещаются в специальные архивы, из которых возможен их быстрый выбор для проведения онлайн-обработки и предоставления пользователям через интерфейсы STS. На этапе входной обработки данных строятся также информационные продукты, ориентированные на проведение анализа океанических процессов и явлений.



Р и с. 2.29. Схема организации поступления данных в спутниковый сервис STS [Луян и др., 2012]

Основной задачей спутникового сервиса STS является обеспечение исследователей возможностями доступа и инструментами анализа информации, полученной на основе данных дистанционных наблюдений, для изучения процессов и явлений в Мировом океане. При этом исследователи получают возможность комплексного описания различных явлений и процессов, оценку их количественных и качественных характеристик, а также инструменты анализа для изучения условий возникновения и развития этих явлений, исследования пространственных и временных характеристик распределений различных явлений, наблюдаемых в Мировом океане. Вследствие этого, спутниковый сервис STS состоит из следующих подсистем, ориентированных на решение его основных задач:

- подсистема сбора данных из различных источников и их обработки для получения различных информационных продуктов, необходимых для изучения явлений, наблюдаемых в Мировом океане;
- подсистема ведения специализированных архивов спутниковых данных и результатов их обработки, обеспечивающая поиск и быстрый выбор необходимых наборов данных для проведения их анализа и обработки;
- подсистема, обеспечивающая работу интерфейсов к данным, которая фактически решает следующие основные задачи: позволяет осуществлять удобный поиск и выбор наборов данных по заданным районам и периодам времени, в которых наблюдались исследуемые явления; позволяет проводить анализ данных. В частности, обеспечивает возможность визуализации и совместного анализа различных типов данных, возможность их преобразования в удобный для анализа вид (например, контрастирование и построение различных цветосинтезированных композитов), а также возможность получения различных характеристик изучаемых объектов и т. д.;
- подсистема создания и ведения описаний различных типов изучаемых явлений (ведения баз данных явлений по различным регионам наблюдений);
- подсистема анализа различных явлений, включая возможность анализа пространственных и временных распределений, анализа различных характеристик и поиск связей между ними для построения различных моделей динамики различных процессов на поверхности океана.

Поскольку спутниковый сервис STS позволяет работать с архивами данных, которые сегодня содержат в общей сложности более ста тысяч сцен различной информации, накопленной за более чем десятилетний период времени, одной из основных процедур, которую вынужден осуществлять исследователь, работающий с сервисом — это поиск и выбор нужного ему для анализа набора данных. Именно поэтому при создании интерфейсов особое внимание уделялось вопросам обеспечения удобного выбора параметров для поиска данных (географический район, дата, время, тип информационного продукта, источник, из которого получены данные и т. д.). Специалист, работающий с сервисом, имеет возможность найти данные, удовлетворяющие заданным им параметрам и осуществить достаточно быстрый просмотр этих данных. При этом возможен просмотр как прореженных данных (квиклуков), так и информации в полном пространственном разрешении соответствующего сенсора. Вся информация (вне зависимости от прибора и продукта) будет представлена для просмотра в одной географической проекции по заданному району поиска. Это позволяет сразу

сопоставить различные виды информации и выбрать необходимые для анализа данные. Выбранную информацию пользователь может поместить в специальный раздел интерфейса и в дальнейшем проводить анализ именно этой информации. Пример представления в интерфейсе STS данных, полученных от различных спутниковых систем по заданному району, приведён на рис. 2.30.

Произведя выбор данных, необходимых для анализа какого-то процесса или явления, исследователь может, используя возможности интерфейсов STS, приступить непосредственно к тематическому анализу. Следует особо отметить, что тем самым исключается достаточно трудоёмкий этап работы с данными, который в настоящее время присутствует практически во всех системах, использующих такие данные спутникового дистанционного зондирования. Спутниковый сервис STS позволяет проводить операции преобразования и анализа данных, не перемещая их в какое-то специализированное хранилище, а получая данные «на ходу» из архивов STS.

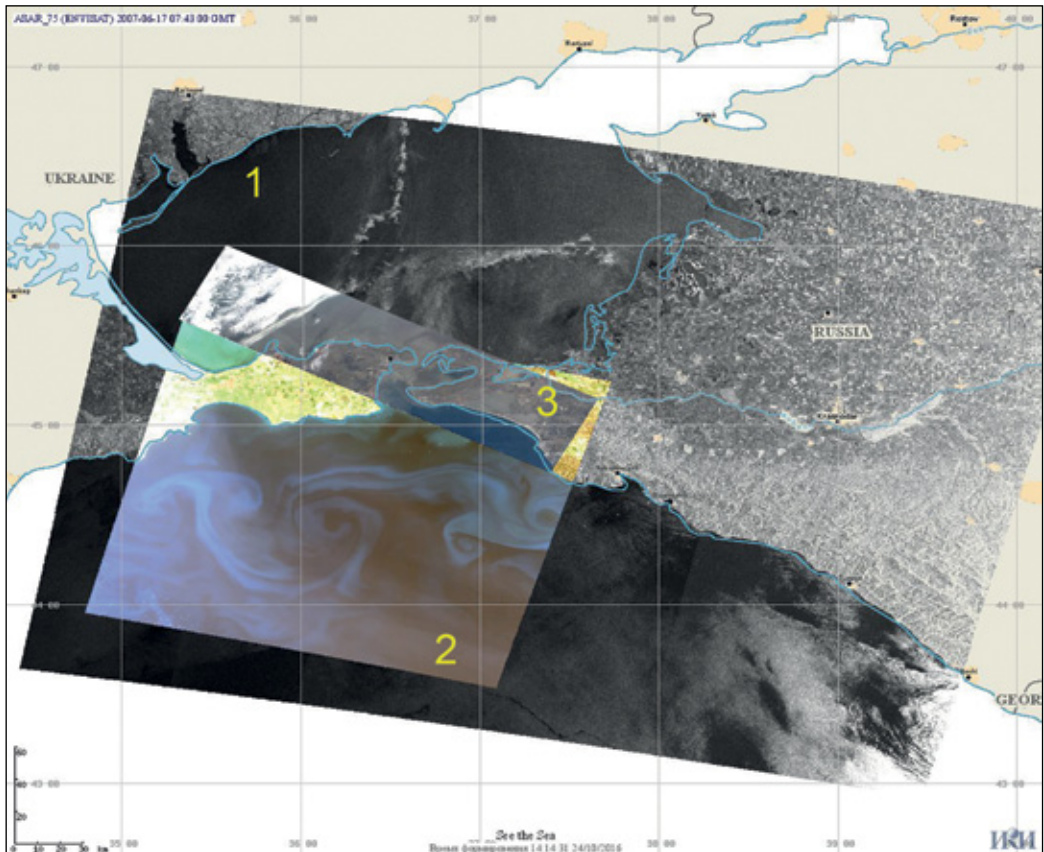


Рис. 2.30. Пример одновременного отображения в картографическом интерфейсе STS данных различных спутниковых систем, полученных над районом Керченского пролива: 1 — РЛИ сенсора ASAR Envisat; 2 — изображение, цветосинтезированное на основе данных сенсора OLI Landsat-8 (R — Band 4, G — Band 3, B — Band 2); 3 — изображение, цветосинтезированное на основе данных гиперспектрометра NICO (R — Band 29, G — Band 21, B — Band 12)

В настоящее время интерфейсы STS позволяют, в частности: проводить контрастирование данных, преобразование данных к различным шкалам, сравнение разновременных данных, построение цветосинтезированных композитов на основе различных каналов и типов данных (в том числе, используя разновременные данные), оценку численных характеристик параметров различных объектов, поточечный анализ значений для различных продуктов и т. д.

Как уже говорилось выше, основной задачей спутникового сервиса STS является обеспечение возможности анализа различных океанических процессов и явлений на основе спутниковых данных. При этом следует иметь в виду, что в настоящее время далеко не для всех явлений и типов наблюдения могут быть созданы системы автоматической обработки данных, позволяющие проводить поиск и выбор интересующих явлений. Особенно трудно поддаются автоматизации процессы обработки информации, поступающей от радиолокационных систем наблюдения. С учётом этих особенностей, спутниковый сервис STS в основном ориентирован на то, чтобы обеспечить для исследователя инструмент, позволяющий визуально найти тот или иной процесс, описать его, используя различную комплексную информацию, и сохранить эту информацию в специализированную базу данных для её дальнейшего анализа. Для решения этой задачи в STS внедрена подсистема создания и ведения описаний различных типов изучаемых явлений, которая позволяет с помощью интерфейсов STS выделить то или иное явление или процесс, сформировать его описание и поместить в базу данных.

Для того чтобы можно было наиболее эффективно проводить анализ различных явлений, выявлять их особенности и природу возникновения, в STS сделана попытка реализовать максимально стандартизированную схему описания набора наиболее часто наблюдаемых и вызывающих интерес у исследователей океанических процессов и явлений. Для этого сформирован список процессов и явлений, на работу с которыми ориентирован сервис STS. На настоящий момент список включает около 40 явлений (объектов), таких, например, как океанические вихревые структуры, вихревые структуры в приводном слое атмосферы, океанические внутренние волны; нефтяные загрязнения, обусловленные сбросами с судов; естественные выходы углеводородов с морского дна; антропогенные загрязнения морской поверхности; поверхностные плёнки биогенного происхождения; береговые стоки; районы цветения водорослей; атмосферные гравитационные волны; атмосферные и океанические фронты; дождевые ячейки и конвективные структуры в приводном слое атмосферы и т. д.

Для каждого объекта определён оптимальный набор, характеризующих их параметров и сформирован раздел специализированной базы данных, ориентированный на работу с тем или иным явлением. Для каждого объекта разработаны также порядок его занесения, способ представления и варианты включения в процедуры тематической обработки. Предпринята попытка реализовать максимально стандартизированную схему описания. Например, описание нефтяного пятна на морской поверхности включает в себя: координаты начала и конца сликовой полосы, координаты центра пятна, совокупная длина сброса, общая площадь загрязнения, факт наличия судна — потенциального источника загрязнения и его координаты на момент съёмки. Описание поверхностного проявления внутренних волн в море включает в себя: координаты центра пакета внутренних волн, глубина места, где выявлены поверхностные проявления внутренних волн, количество волн в пакете, длина фронта ведущей

волны, ширина пакета, максимальная длина волны в пакете, направление распространения, наличие нелинейных взаимодействий. Каждый же установленный факт наблюдения вихревых структур (вихри и диполи) сопровождается сопутствующей информацией: момент наблюдения, географическое местоположение, размеры малой и большой полуосей, диаметр, эксцентриситет, знак вращения, направление и скорость распространения, сведения об источнике и механизме генерации. Естественно, что список явлений и наборы, описывающих их параметров, являются открытыми и могут достаточно легко быть расширены и модифицированы.

Пример выделения и описания в STS нефтяного загрязнения морской поверхности, обусловленного естественными выходами углеводородов с морского дна, приведен на рис. 2.31.

Для исследования различных процессов и явлений в составе STS создана подсистема анализа различных явлений. Эта подсистема обеспечивает не только возможность анализа различных характеристик изучаемых явлений, в частности пространственных и временных распределений, но и поиск связей между ними, необходимый для построения различных моделей динамики изучаемых океанических процессов. В целом, спутниковый сервис STS призван обеспечивать возможность проведения комплексных исследований. Примерная схема организации таких исследований с использованием спутникового сервиса STS приведена на рис. 2.32.

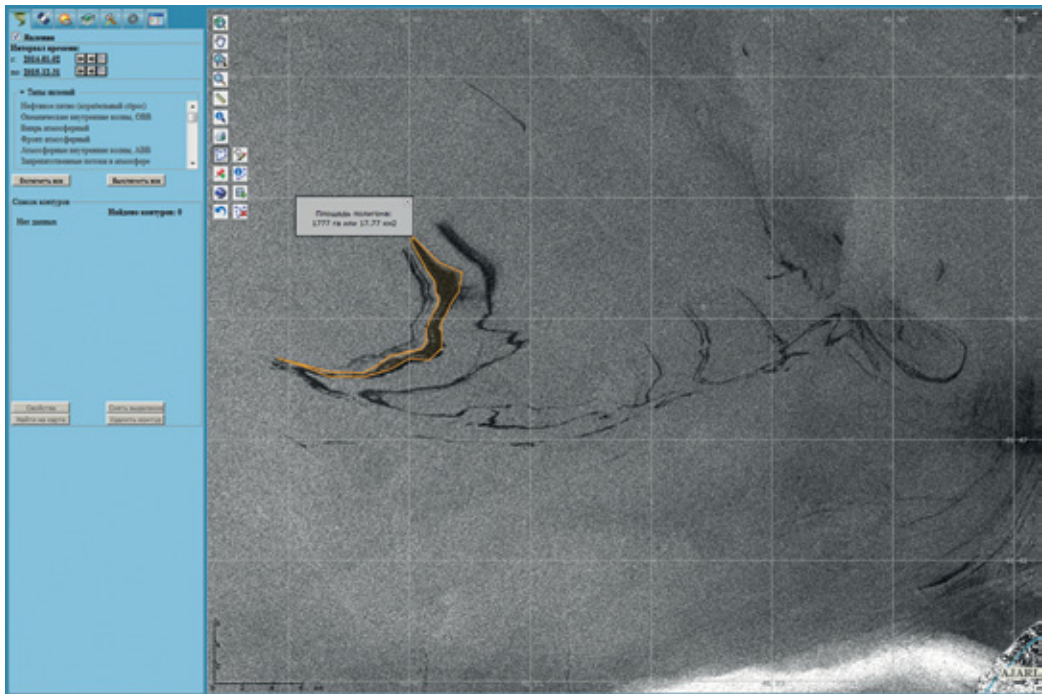
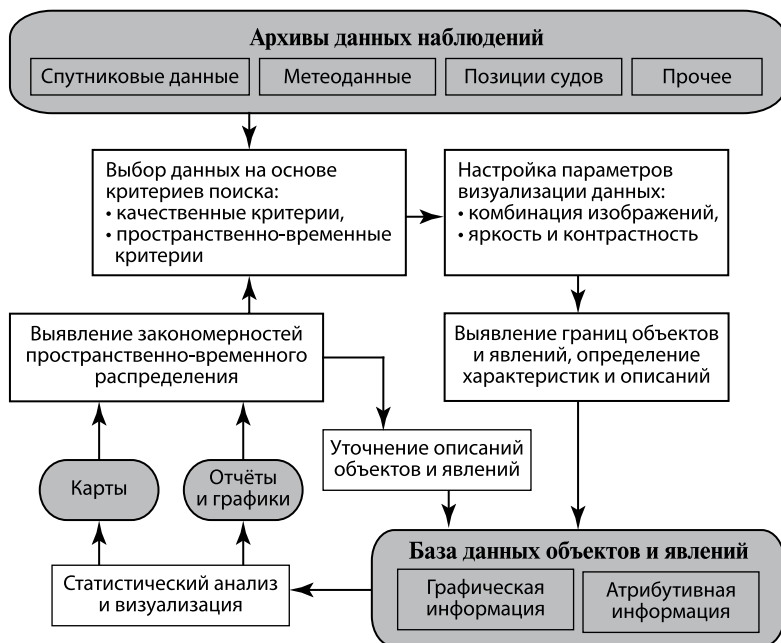


Рис. 2.31. Пример выделения и описания в интерфейсе STS нефтяного загрязнения морской поверхности, обусловленного естественными выходами углеводородов с морского дна, детектированного на спутниковом РЛИ



Р и с. 2.32. Примерная схема исследований различных процессов и явлений в океане с использованием спутникового сервиса STS [Лупян и др., 2012]

Предоставляемый исследователям инструментарий для комплексного анализа различных явлений и процессов в Мировом океане, оценки их количественных и качественных характеристик, выявления пространственных и временных изменчивостей, изучения условий возникновения и развития базируется на технологии, которая позволяет проводить совместный анализ и обработку «на лету» данных из распределённых архивов с использованием распределённой вычислительной сети. Благодаря этому пользователи получили возможность использовать распределённые информационные и вычислительные ресурсы с той же лёгкостью, что и локальные.

В частности, на базе этой технологии разработан и интегрирован в систему STS инструмент для проведения классификаций различных типов водной поверхности, что позволяет интерактивно создавать соответствующие карты на основе спутниковых изображений. Задача классификации изображений, традиционно выполняемая с помощью специализированного программного обеспечения, в настоящее время стала возможна в рамках картографического интерфейса системы STS. Доступна как неконтролируемая классификация (кластеризация) изображений, так и классификация с обучением. Для выявления различных типов загрязнений наиболее целесообразно использование классификации с обучением. При этом используется база данных исследуемых точек, заданных пользователем и отнесённых к различным классам. Результат классификации отображается непосредственно в браузере. Отдельно отметим большую гибкость этих инструментов: возможность совместной одновременной классификации различных данных, разновременных сцен, любых выбранных пользователем каналов и т. д.

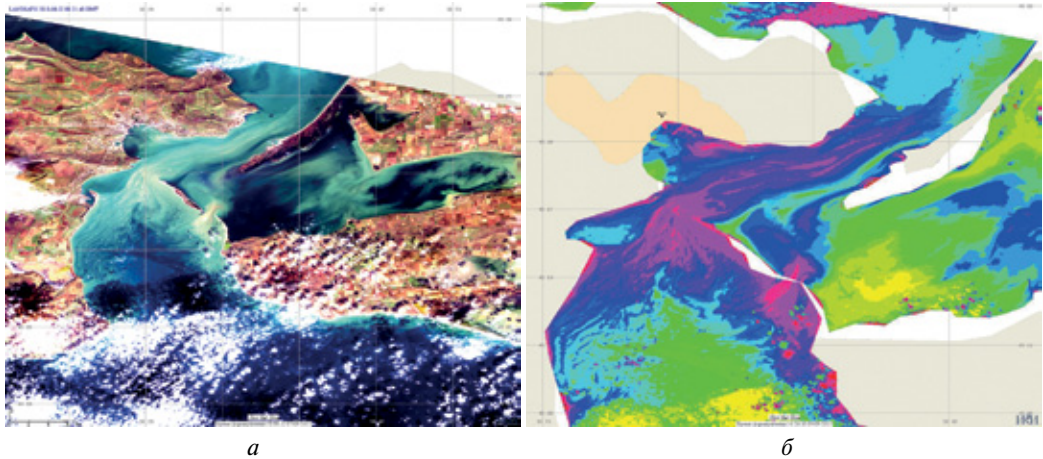


Рис. 2.33. Фрагмент цветосинтезированного изображения (R 640–670 нм, G 530–590 нм, B 430–450 нм) многоканального сенсора OLI-TIRS Landsat-8, полученного 22 октября 2013 г. в 08:21:40 UTC над акваторией Керченского пролива (а); результат многоклассовой классификации с применением инструментария STS (б)

На рис. 2.33 представлен пример использования инструмента классификации для определения типа течений в Керченском проливе на основе спутниковых много-спектральных данных. Приведённый пример отражает так называемый черноморский тип течения, который формируется под влиянием устойчивых ветров южных румбов.

Особо следует отметить, что у специалистов, работающих с системой, отсутствует необходимость иметь на своём компьютере специализированное программное обеспечение, что позволяет избежать необходимость загрузки больших объёмов данных для проведения их обработки; обеспечивает возможность проведения анализа данных, предоставляемых системой, с использованием лишь стандартного интернет-браузера (т. е. практически с любого компьютера, имеющего доступ в сеть интернет).

Возможности спутникового сервиса STS будут проиллюстрированы ниже примерами анализа, выполненного с его помощью в ходе решения задачи выявления акваторий, наиболее подверженных экологическим рискам, на основе спутниковых данных.

2.4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СУДОВЫХ СБРОСОВ НА СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

По статистике в Мировом океане судоходство является причиной 45 % нефтяного загрязнения океана, в то время как добыча нефти на шельфе — только 2 %, поэтому судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону. Утечки и сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты, представляют собой наиболее

распространённый источник нефтяного загрязнения морской поверхности. Катастрофические разливы нефтепродуктов, прежде всего, при авариях танкеров или на морских буровых платформах, происходят довольно редко, и, как правило, не остаются без внимания прессы и общественности. Гораздо чаще загрязнение поверхности моря происходит при рутинных операциях на судах. Основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются нефтесодержащие промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов. Наши многолетние наблюдения показали, что незаконные сбросы с судов настолько распространены в Балтийском и Чёрном морях, что в совокупности могут нанести сложившимся экосистемам морей даже больший ущерб, чем отдельные катастрофические разливы нефти [Лаврова, Митягина, 2012; Kostianou, Lavrova, 2014; Larova et al., 2011, 2014].

Основой метода спутникового мониторинга загрязнения морской поверхности является возможность выявления областей, покрытых поверхностными, в том числе нефтяными, плёнками (так называемых плёночных сликов) методами спутниковой радиолокации. Наличие поверхностной плёнки приводит к понижению интенсивности ветро-волнового взаимодействия и к затуханию резонансной гравитационно-капиллярной компоненты поверхностного волнения. В этом случае на поверхности океана образуются выглаженные области (слики), которые проявляются на радиолокационном изображении как области пониженного рассеяния, которые могут служить индикаторами загрязнения поверхности [Булатов и др., 2003; Митягина, Чурумов, 2006; Mityagina, Churumov, 2006].

Радиолокационные образы разливов нефтепродуктов на морской поверхности зависят от внешних условий. Контраст между областью разлива и окружающей морской поверхностью определяется рядом параметров, таких как скорость ветра, высота волн, количество и тип разлитой нефти. Форма разлива оказывается разной в случаях выброса нефти из стационарного и движущегося объекта.

Одним из главных характерных признаков, помогающих выявить на РЛИ загрязнение морской поверхности нефтепродуктами, содержащимися в судовых сбросах, является его геометрическая форма. С этой точки зрения, сбросы с кораблей можно условно разделить на два класса – сбросы с судов во время их движения и сбросы с неподвижных судов. В обоих случаях на РЛИ пятна выглядят «инородными телами» на фоне общей структуры изображения.

При сбросе с судна в движении пятно нефтепродуктов, в отсутствие сильного ветра и волнения, проявляется на РЛИ в виде узкой полосы понижения сигнала, повторяющей маршрут движения корабля. Чаще всего, это узкая прямая полоса или полоса с изломом, если судно меняло курс. Если сброс происходил во время радиолокационной съёмки или непосредственно перед ней, то полоса сужается в сторону более свежей её части, и, как правило, удаётся идентифицировать и судно-виновника сброса, которое также хорошо видно на РЛИ в виде яркой белой точки (рис. 2.34, 2.35а).

Здесь следует отметить, что можно определить название, тип и принадлежность судна-виновника разлива с помощью системы автоматической идентификации судов (AIS) в случае, если координаты судна на РЛИ и в системе AIS совпадают. В более сложных случаях, когда на РЛИ судна в непосредственной близости от нефтяного пятна не видно или наоборот, наблюдается несколько судов, то используются возможности численного моделирования дрейфа и трансформации нефтяных пятен

с встроенными модулями AIS, которые позволяют идентифицировать потенциального виновника сброса нефтепродуктов. Такими возможностями обладает, например, интерактивная численная модель Seatrack Web Шведского метеорологического и гидрологического института (SMHI), которая рекомендована комиссией HELCOM всем балтийским странам для моделирования нефтяных разливов на Балтике и которой мы успешно пользуемся с 2004 г. [Kostianou et al., 2014b]. Один из недавних примеров успешного использования этой модели и системы AIS, а именно, беспрецедентный случай выявления нефтяного загрязнения в Гданьском заливе 23 июля 2016 г. [Костяной и др., 2016] будет подробно описан третьей главе этой монографии.

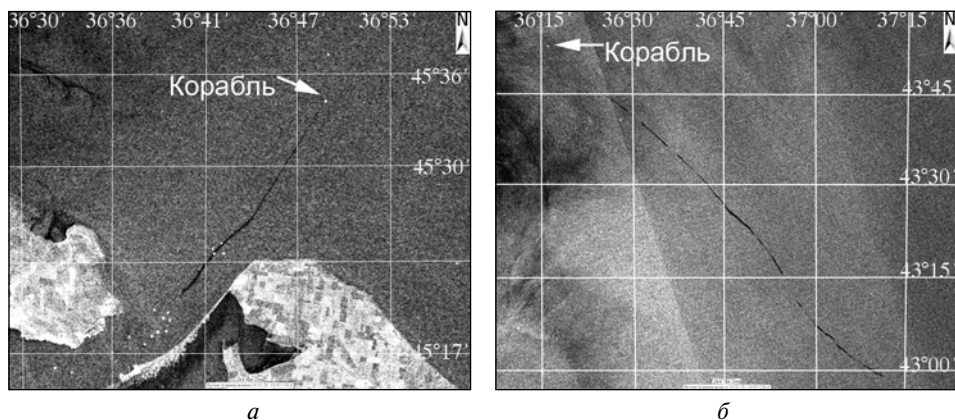


Рис. 2.34. Проявления на спутниковых РЛИ свежих сбросов нефтесодержащих вод с движущихся судов: *а* — ASAR Envisat, 10.06.2008, 19:18 UTC. Протяжённость нефтяного загрязнения 21 км; *б* — ASAR Envisat, 23.06.2011, 19:29 UTC. Протяжённость нефтяного загрязнения — 114 км

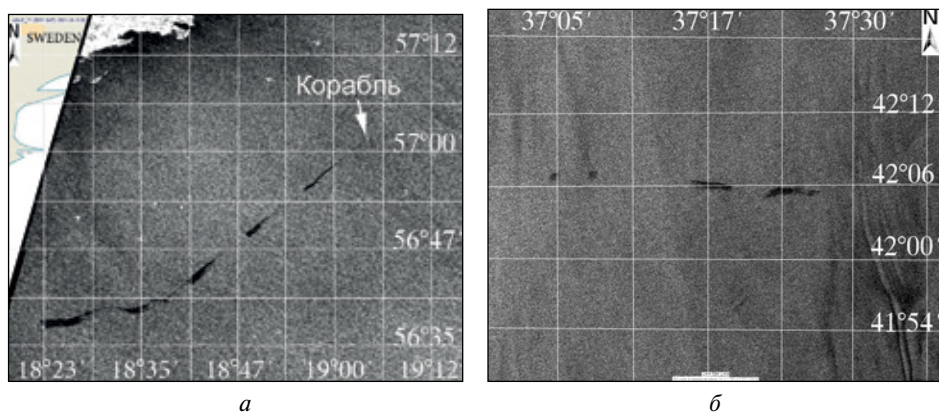


Рис. 2.35. Проявления на спутниковых РЛИ многократных сбросов нефтесодержащих вод с движущихся судов: *а* — ASAR Envisat, 18.10.2005, 08:57 UTC. Протяжённость нефтяного загрязнения — 114 км, площадь — 67 км²; *б* — ASAR Envisat, 13.02.2009, 19:23 UTC. Протяжённость нефтяного загрязнения 21,5 км. Общая площадь загрязнений — 8,2 км²

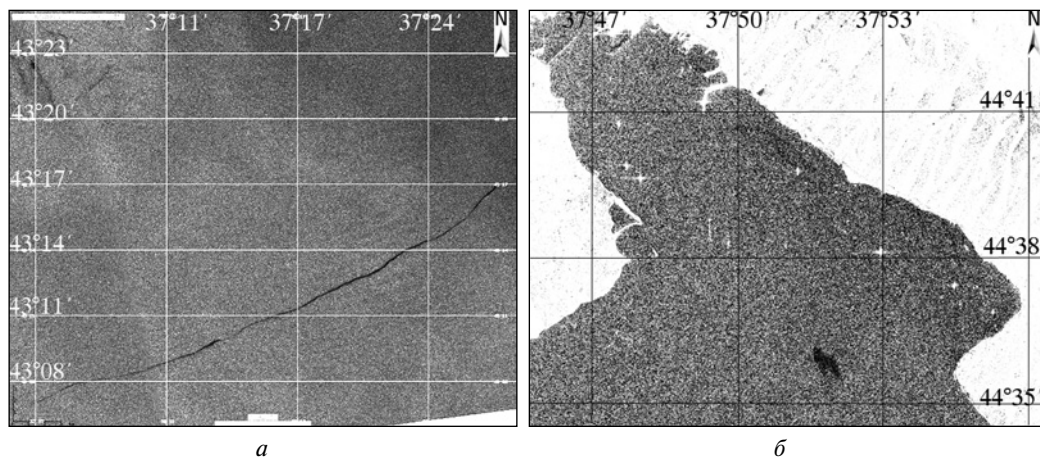


Рис. 2.36. SAR Sentinel-1A, 03.05.2015, 15:43 UTC. Протяжённость нефтяного загрязнения от движущегося судна 70 км (а); ASAR Envisat, 01.08.2007, 07:29 UTC. Сброс с неподвижного судна загрязнённых вод на входе в Цемесскую бухту (Новороссийск). Общая площадь загрязнения — $0,6 \text{ км}^2$ (б)

Суда могут сбрасывать воды, содержащие нефтепродукты, на протяжении нескольких десятков километров своего пути. На рис. 2.34 приведены примеры радиолокационных образов «идеальных» свежих сбросов. Изображение, приведённое на рис. 2.34а, получено в районе Керченского пролива в условиях слабого ветра и небольшого волнения, а изображение, приведённое на рис. 2.34б — в центральной части Чёрного моря в условиях умеренного ветра и развитого волнения. Сужение полос к северо-востоку и северо-западу, соответственно, свидетельствует о том, что суда, сбрасывающие нефтепродукты, движутся в этих направлениях. Яркие точки на северо-восточном и северо-западном концах полос показывают текущее положение судов. В первом случае полоса загрязнений тянется на 21 км, во втором — на 114 км.

Нередко суда производят многократные сбросы загрязнённых вод в движении. Два таких примера представлены на рис. 2.35а и 2.35б. На рис. 2.35а изображён фрагмент РЛИ поверхности Балтийского моря. Вдоль основной судоходной трассы, расположенной восточнее о. Готланд, выделяется чёткий прерывистый след протяжённостью около 80 км сброса за судном, движущимся на северо-восток. Разлив происходил незадолго до момента радиолокационной съёмки, растекание плёнки ещё в самом начале — полоса сужена по направлению к судну и имеет высокий контраст по отношению к окружающей морской поверхности. Заканчивается он яркой точкой, отмечающей положение движущегося судна. Очевидно, сброс осуществлялся в несколько этапов, общая площадь загрязнений на момент радиолокационной съёмки составляла около 67 км^2 . Существенно большей степенью растекания плёнки и более слабым контрастом с окружающим фоном отличается прерывистая полоса протяжённостью 21,5 км, представленная на рис. 2.35б и расположенная в юго-восточной части Чёрного моря. Этот разлив произошёл за несколько часов до съёмки, и судно-виновника выявить невозможно. Очевидно, сброс осуществлялся в несколько этапов, общая площадь загрязнений, выявленная по РЛИ, составляла около $8,2 \text{ км}^2$.

Усложнение гидрометеорологических условий — усиление приводного ветра, развитие волнения — затрудняет распознавание нефтяных плёнок. На примере, показанном на рис. 2.36а, виден разлив длиной около 70 км, произведённый с движущегося судна в центральной части Чёрного моря. Форма полосы исказилась вследствие воздействия локальных течений и приповерхностного ветра, сужение в сторону более свежей части разлива определить не так легко, а кроме того, нельзя однозначно указать на судно-виновника разлива. Осложняющим фактором в данном случае является неустойчивая стратификация пограничного слоя море-атмосфера, дающая неровный, ячеистый фон на изображении.

При сбросе с неподвижного судна, в отсутствие ветра и волнения, растекание нефти происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. Однако наличие ветра, волнения и течений может оказать существенное влияние на структуру пятна (рис. 2.36б). В некоторых случаях пятно может вытянуться в линию так, как будто сброс произошёл с движущегося судна.

Ветер существенно влияет на внутреннюю структуру нефтяного разлива, как напрямую, так и опосредованно. Под непосредственным воздействием ветра плёнка нефти перемещается, а нефть аккумулируется на подветренной стороне пятна. Кроме того, приповерхностный ветер возбуждает динамические процессы в верхнем слое воды. Наиболее распространённый из таких процессов — циркуляция Ленгмюра, представляющая собой вытянутые по ветру вихри перемежающихся направлений. Движение воды в вихрях происходит в плоскости, перпендикулярной направлению скорости ветра. Тем самым на поверхности моря возникают перемежающиеся зоны дивергенции и конвергенции. В последних и концентрируется нефть. Пятно приобретает характерный вид «гребёнки». Площадь загрязнения увеличивается. Примеры такой трансформации полосы сброса с движущегося судна приведены на рис. 2.37.

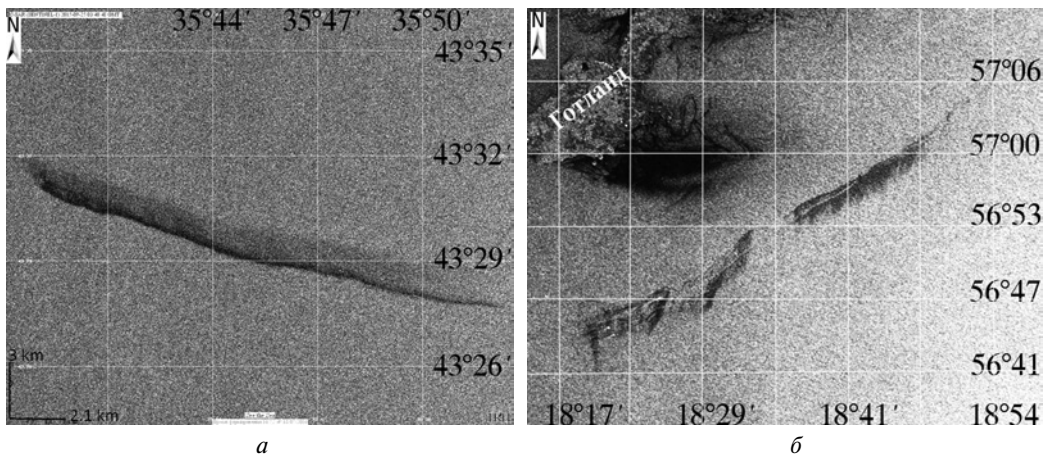


Рис. 2.37. Трансформация нефтяного пятна — «гребёнка»: а — SAR Sentinel-1A, 25.09.2015. Центральная часть Чёрного моря. Протяжённость 19 км, общая площадь загрязнения — 17 км²; б — ASAR Envisat, 11.07.2010. Восточная часть Балтийского моря. Протяжённость 51 км, общая площадь загрязнения — 105 км²

2.5. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Важнейшим фактором, определяющим возможность достоверного детектирования нефтяных загрязнений морской поверхности на радиолокационных изображениях является приповерхностный ветер [Gade, 2006]. При скорости ветра, превышающей 9–10 м/с, плёночные загрязнения любой природы — как нефтяные, так и биогенные — не различимы на радиолокационных изображениях морской поверхности.

В штилевых условиях или при слабых неустойчивых ветрах резонансная составляющая поверхностного волнения может не развиваться, что приводит к ослаблению радиолокационных контрастов. На радиолокационных изображениях морской поверхности, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра ($<2-3$ м/с), присутствует большое количество областей ослабления рассеяния, не относящихся к плёночным загрязнениям, что повышает вероятность «ложной тревоги» при детектировании пятен нефтяных загрязнений по радиолокационным данным.

Зачастую, неоднозначности в интерпретации радиолокационных данных и выявлении нефтяного загрязнения морской поверхности могут быть разрешены на основе комбинированного использования данных спутниковой радиолокации и данных, полученных в видимой и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра. Данные сенсоров оптического диапазона, особенно полученные в зоне солнечного блика, могут нести в себе дополнительную информацию о процессах и явлениях, происходящих на морской поверхности, в том числе и в областях локального ослабления ветра, т. е. в тех областях, которым на РЛИ соответствуют тёмные участки пониженной интенсивности обратно-рассеянного сигнала.

В областях солнечного блика значительную часть регистрируемого излучения составляет солнечная радиация, отражённая от морской поверхности. Неоднородная шероховатость морской поверхности, т. е. неоднородность поля поверхностного волнения, обуславливает появление большого количества фасетов различной ориентации, зеркально отражающих солнечную радиацию под различными углами и в разных направлениях. Формирующиеся в зоне солнечного блика контрасты яркости зависят от распределения уклонов поверхностного волнения, направления падающего солнечного излучения и угла визирования сенсора [Jackson, Alpers, 2010]. Большинство явлений, проявляющихся на морской поверхности, таких как, например, биогенные и нефтяные плёнки, внутренние волны, кильватерные следы за кораблями, спиралевидные вихри и пр. меняют локальную шероховатость поверхности, что и приводит к их проявлениям в оптических данных [Юровская и др., 2014].

Следует отметить, что на оптических изображениях нефтяные плёнки могут выявляться лучше, чем в радиолокационных изображениях, так как наблюдаемые контрасты вызваны не только затуханием поверхностных волн, но и различиями в оптических характеристиках чистой воды и плёнок. В случае поверхностных сликов наблюдаемые контрасты яркости обусловлены физико-химическими свойствами плёночных загрязнений и определяются как типом (биогенного происхождения или нефтяной), так и толщиной плёнки, образующей слик.

Совместный анализ спутниковых РСА-изображений и изображений много-спектральных сенсоров оптического диапазона, синхронно полученных в области проявления естественных углеводородов в юго-восточной части Чёрного моря позволили

выявить подобию и различия в проявлениях на них плёночных сликов различной природы. Для решения вопроса о принадлежности детектированных в этом районе плёночных загрязнений морской поверхности к нефтесодержащим или биогенным плёнкам был проведён совместный анализ радиолокационных данных Sentinel-1A SAR (рис. 2.38а) и данных видимого диапазона сенсора OLI Landsat-8 (рис. 2.38б).

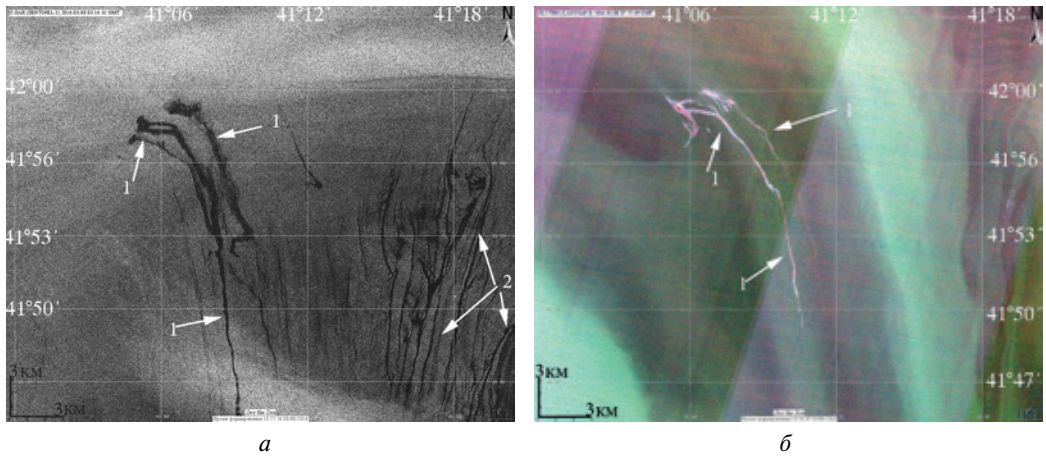


Рис. 2.38. Пример совместного анализа радиолокационного и оптического изображений: *а* — фрагмент РЛИ Sentinel-1A SAR от 8.03.2016, 03:16 UTC; *б* — фрагмент цветосинтезированного изображения сенсора Landsat-8 OLI (4-й, 2-й и 1-й спектральные каналы) от 8.03.2016, 07:55 UTC. 1 — нефтесодержащие поверхностные плёнки; 2 — биогенные плёнки

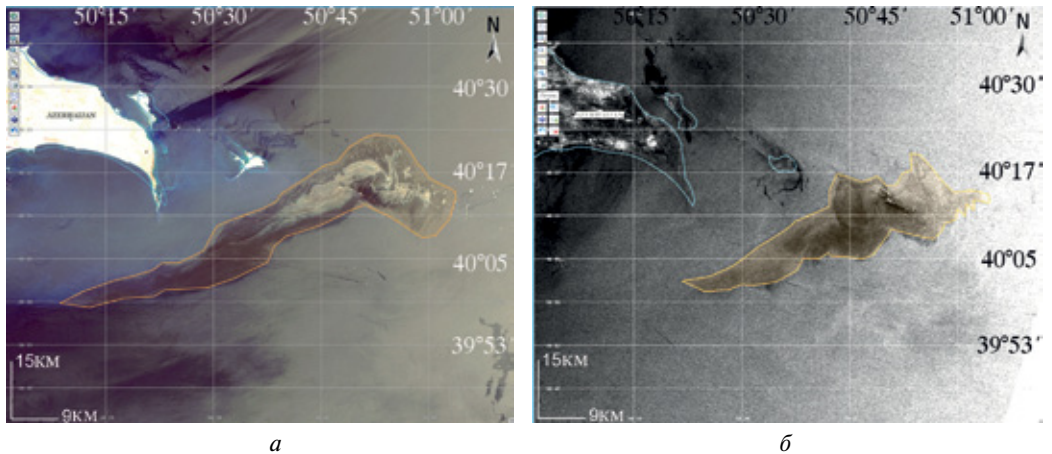


Рис. 2.39. Пример совместного анализа радиолокационного и оптического изображений: *а* — цветосинтезированное (каналы: 630–690 нм красный; 520–600 нм зелёный; 450–520 нм синий) изображение сенсора ТМ ИСЗ Landsat-5, полученное 05.06.2011 г. в 07:08 UTC в зоне солнечного блика над районом Нефтяные Камни; *б* — радиолокационное изображение, полученное сенсором ASAR Envisat 06.06.2011 в 06:57 UTC над тем же районом

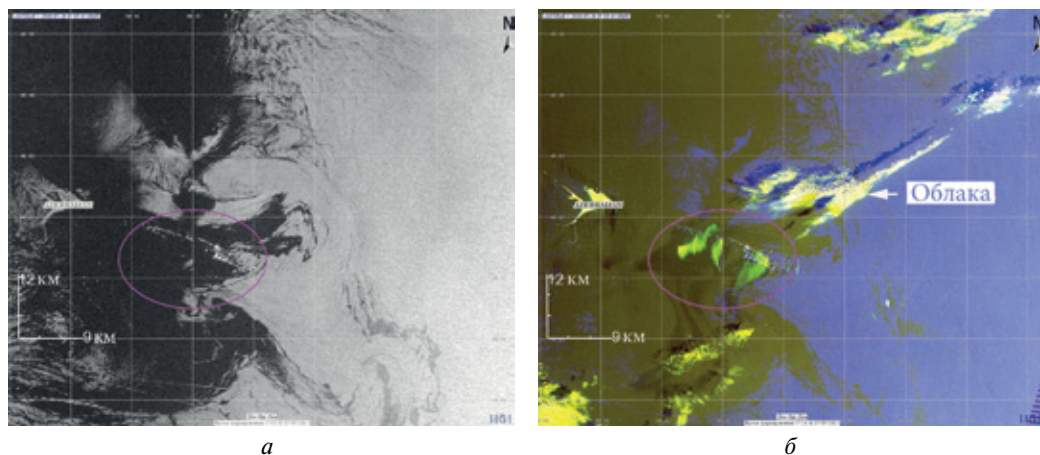


Рис. 2.40. Пример совместного анализа радиолокационного и оптического изображений: *а* — фрагмент Envisat ASAR изображения, полученного 19.07.2010 в 06:50 UTC; *б* — композит Envisat ASAR изображения и цветосинтезированного изображения сенсора ТМ ИСЗ Landsat-5, полученного над тем же районом в близкий момент времени

На радиолокационных изображениях проявляются слики как нефтесодержащих плёнок, так и плёнок биогенного происхождения, однако различить их трудно, а зачастую и невозможно. В то же время в данных оптического диапазона нефтесодержащие слики и слики, обусловленные биогенными плёнками, проявляются различным образом (см. рис. 2.38). На цветосинтезированном изображении нефтесодержащие слики имеют повышенную яркость и проявляются как светлые структуры, в то время как слики плёнок биогенного происхождения не выявляются. Этот результат можно объяснить различием упругостей нефтяных плёнок и плёнок биологического происхождения [Ермаков, 2010].

Представляет интерес также сравнительный анализ отображения нефтяных плёнок в спутниковых изображениях оптического и микроволнового диапазонов, полученных над районом нефтедобычи в центральной части Каспийского моря. В частности, на рис. 2.39 представлен пример совместного анализа данных оптического многоканального сенсора ТМ Landsat-5 и данных PCA ASAR Envisat, полученных над районом нефтедобычи с интервалом в сутки. На цветосинтезированном изображении сенсора ТМ ИСЗ Landsat-5, полученном 05.06.2011 в 07:08 UTC в зоне солнечного блика (рис. 2.39а) плёночное загрязнение вокруг платформы Нефтяные Камни проявляется в виде характерного радужного пятна с более темным ореолом, что отражает неравномерность толщины плёночного покрытия. В зоне солнечного блика менее шероховатый участок имеет большую яркость в силу наличия большего числа локальных элементов, отражающих прямое солнечное излучение, и наличие на морской поверхности плёночных загрязнений может оказывать существенное влияние на интенсивность отражённого поверхностью оптического излучения. Площадь загрязнения составляет около 610 км^2 . Кроме того, в поле взвеси в прибрежной зоне вокруг полуострова Апшерон выявляются элементы мезомасштабной динамики вод. На радиолокационном изображении, полученном над тем же районом 06.06.2011 в 06:57 UTC

(рис. 2.39б) площадь пятна уменьшилась до 416 км², неравномерности толщины плёнки на РЛИ не выявляются.

На рис. 2.40а представлено ещё одно спутниковое РЛИ Envisat ASAR, полученное над районом нефтедобычи Нефтяные Камни в Каспийском море. На РЛИ выделяются обширные тёмные области ослабления обратно-рассеянного сигнала, соответствующие зонам слабого приповерхностного ветра. Идентифицировать слики нефтесодержащих плёнок на этом изображении не представляется возможным. Тем не менее, привлечение к анализу данных, полученных многоспектральным сенсором оптического диапазона Landsat-5 ТМ в близкое время над тем же районом в зоне солнечного блика, позволяет разрешить эту задачу – выделить нефтяные пятна и исключить области ослабления ветра. Для иллюстрации на рис. 2.40б представлен композит РЛИ и изображения в псевдоцветах, синтезированного на основе данных Landsat-5 ТМ. Участки морской поверхности, покрытые нефтяной плёнкой, выявляются на оптическом изображении в виде характерных радужных пятен с темным ореолом по периметру (см. рис. 2.40а).

Глава 3

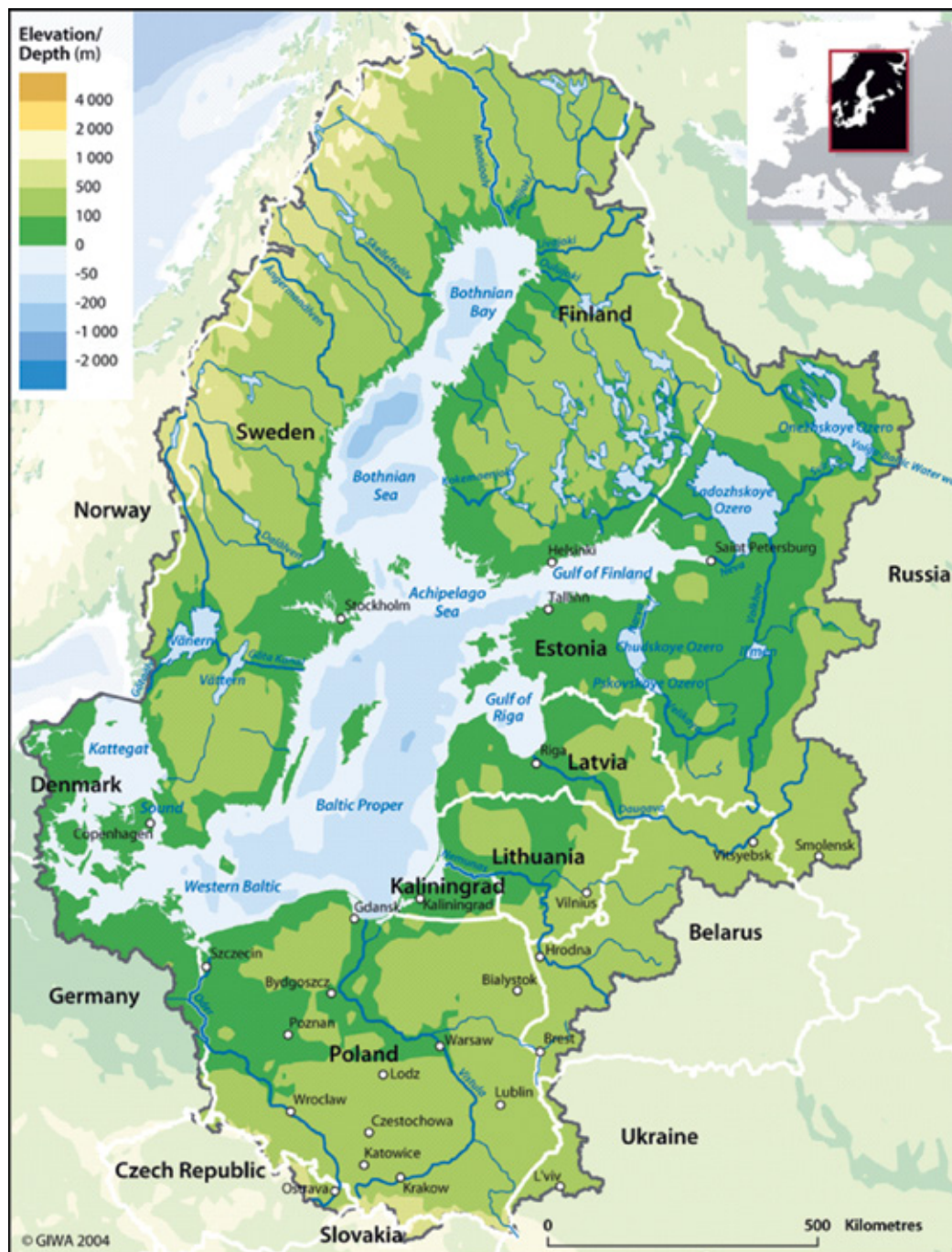
БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ

3.1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Балтийское море является внутриконтинентальным шельфовым бассейном Атлантического океана. Оно омывает берега Дании, Германии, Польши, России, Финляндии, Швеции, Литвы, Латвии и Эстонии (рис. 3.1). На западе граница Балтийского моря проходит по линии мыс Скаген (северная оконечность п-ва Ютландия) — юго-западная оконечность о. Чёрн (севернее Гетеборга). Связь Балтийского моря с Атлантическим океаном осуществляется через Северное море, проливы Скагеррак, Каттегат и Датские проливы (Большой и Малый Бельт, Эресунн (Зунд) и Фемарн-Бельт), однако эта связь затруднена из-за мелководности проливов (глубина на порогах 7–18 м). Затруднённый водообмен между Балтийским и Северным морями играет важнейшую роль в формировании природных особенностей Балтийского моря [Гидрометеорология..., 1992б; Зонн и др., 2015а].

Крайняя северная точка Балтийского моря расположена у полярного круга ($65^{\circ}50'$ с. ш.), а крайняя южная точка — в Щецинском заливе ($53^{\circ}40'$ с. ш.). Таким образом, море по меридиану вытянуто на $12^{\circ}10'$, что составляет около 1350 км. Крайняя западная точка моря расположена вблизи порта Фленсбург ($9^{\circ}25'$ в. д.), а крайняя восточная точка — в порту Санкт-Петербург ($30^{\circ}15'$ в. д.), следовательно, по параллели море вытянуто на $20^{\circ}50'$, что составляет также около 1350 км (по параллели 54° с. ш.). Расстояние от порта Торнео, расположенного на крайнем севере моря, до мыса Скаген составляет около 1800 км. Из-за большой вытянутости вдоль меридиана и параллели отдельные районы Балтийского моря размещаются в различных физико-географических и климатических зонах. Это в свою очередь оказывает влияние на океанологические процессы, происходящие в море и отдельных его районах. Площадь Балтийского моря вместе с проливами составляет $425,4$ тыс. км², а объём воды — $20,1$ тыс. км³. Максимальная глубина — 459 м. Протяженность береговой линии приблизительно 8000 км [Гидрометеорология..., 1992б; Зонн и др., 2015а].

Балтийское море имеет очень длинную изрезанную береговую линию, что обусловлено наличием многочисленных заливов и островов, особенно в северной его части. Общее количество островов составляет несколько тысяч, но большинство из них очень мелкие. Наиболее крупные острова: Готланд, Эланд, Сааремаа, Рюген, Хийумаа, Борнхольм и др. [Доронин, 1986].



Р и с. 3.1. Карта Балтийского моря и его водосборного бассейна

Средняя глубина моря 48 м, максимальная 459 м (в точке 58°35' с.ш. и 18°14' в.д.). Преобладают глубины до 50 м, на долю которых приходится 60 % площади моря, на долю глубин более 200 м — около 0,3 % площади моря. В 38 милях к востоку от острова Готланд расположена Готландская впадина с глубиной 249 м, а в 45 милях к северу от него находится впадина Ландсортсьюпет, являющаяся самой глубокой впадиной в Балтийском море. В северной части Гданьского залива (54°40' с.ш., 19°10' в.д.) имеется впадина с глубиной 114 м. В южной части Балтийского моря к западу от линии, соединяющей мыс Розеве с мысом Торхамнсудде, глубины уменьшаются от 50–90 м на востоке до 30–40 м на западе района. Берега здесь окаймлены обширными отмелями с глубинами менее 20 м и шириной местами до 40 миль. Как в северной, так и в южной частях Балтийского моря на значительном удалении от берегов среди больших глубин имеются многочисленные банки [Гидрометеорология..., 1992б; Зонн и др., 2015а].

Собственно Балтийское море (без заливов, проливов и бухт) подразделяется на северную часть (от широты Ирбенского пролива на север), центральную часть (от широты Ирбенского пролива до Клайпеды) и южную часть Балтики (от широты Клайпеды до Датских проливов). Меридиан, пересекающий острова Форе и Готланд, условно делит Балтику на восточный и западный секторы.

К существенным факторам, определяющим гидрологический режим моря, относится речной сток и водообмен через проливы. Впадающие в море реки ежегодно вносят в него 472 км³ пресной воды (2,5 % общего его объёма). Около половины стока поступает в восточную часть, куда впадают главные реки Балтийского бассейна: Нева (82 км³/год), Висла (35 км³/год), Неман (22 км³/год) и Даугава (21 км³/год). Среднегодовой объём балтийской воды, выходящей через проливы, — 1660 км³, а объём воды, поступающей в Балтику из Северного моря — 1187 км³. Подводные пороги, поднимающиеся со дна пролива, препятствуют проникновению солёной североморской воды в Балтийское море. Например, через Каттегат может войти лишь 7 % глубинного течения солёностью 33 г/кг (где грамм — это вес выпаренных солей на килограмм воды), а остальные 93 % глубинной воды перемешиваются здесь с балтийской водой выходного течения. Обильный речной сток и затруднённый водообмен через проливы определяют незначительную солёность моря — в среднем 7–8 г/кг (в 4–5 раз меньше солёности Мирового океана) [Доронин, 1986].

В центральных районах море относительно прозрачно до глубины 12–14 м, а у берегов и в устьях рек — до 4–6 м. Стратификация балтийских вод существенно сказывается на распределении кислорода и биогенных веществ в толще моря. Максимальное количество растворенного кислорода наблюдается весной в верхнем слое от 15 до 20 м.

В Ботническом и Финском заливах море частично или полностью покрывается льдом, в суровые зимы толщина неподвижного льда достигает 1 м, а плавучих льдов 40–60 см [Доронин, 1986].

В целом для гидрологического режима Балтийского моря характерны хорошо развитые ветровые течения, преобладание волн высотой до 2 м, относительно высокая температура и малая солёность воды. Температура поверхности моря летом в Финском заливе составляет 15–17 °С, в Ботническом заливе — 9–13 °С, в центре моря — 14–17 °С. Солёность морской воды уменьшается от Датских проливов, связывающих Балтийское море с более солёным Северным морем, к востоку. В Датских

проливах солёность составляет 20 г/кг у поверхности моря и 30 г/кг у дна. К центру моря солёность уменьшается до 6–8 г/кг у поверхности моря, на севере Ботнического залива опускаясь до 2–3 г/кг, в Финском заливе до 2 г/кг. С глубиной солёность увеличивается, достигая в центре моря у дна 13 г/кг [Зонн и др., 2015а].

Действие ветра вместе с резким изменением атмосферного давления при прохождении циклонов создаёт ритмические колебания уровня моря, или сейши (с ними связаны периодические наводнения в Санкт-Петербурге). Наибольший подъём воды в Санкт-Петербурге был отмечен в ноябре 1824 г. (около 4,1 м) и в сентябре 1924 г. (3,69 м). Величина сейшевых колебаний в открытом море 0,2–0,3 м, а в прибрежной зоне достигает местами 1,5 м. Период сейш 23–26 часов. Особенно большие подъёмы воды, являющиеся, как правило, следствием наложения ветрового нагона на гребень длинной волны, бывают в Невской губе. Приливно-отливные колебания на Балтике не превышают 0,2 м. Это объясняется тем, что приливная океаническая волна, доходя до берегов Дании, утрачивает свою силу почти на 90% или затихает совсем [Гидрометеорология..., 1992б].

В юго-восточной части Балтийского моря находятся два практически закрытых водоёма: Куршский залив и Калининградский (Вислинский) залив, которые являются объектами наших спутниковых наблюдений.

Куршский залив — залив-лагуна у юго-восточного побережья Балтийского моря, по акватории которого проходит граница между Российской Федерацией (Калининградская область) и Литовской Республикой. Большая часть акватории (1,3 тыс. км² из 1,6 тыс. км²) относится к России. Объём залива — 6,2 км³. Длина 98 км, ширина (в южной части) около 46 км, средняя ширина 17,3 км, глубина до 7 м. Площадь 1613 км². Залив отделён от моря низменной Куршской косой (ширина от 0,4 до 4 км), соединяется с Балтийским морем узким Клайпедским проливом. На берегу пролива находится литовский порт Клайпеда. Воды залива замерзают зимой, в тёплый период подвержены интенсивному цветению фитопланктона. Куршская коса является национальным парком, в 2000 г. была включена в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.

В Куршский залив впадает много рек, крупнейшая из них — Неман. Общий годовой сток рек в залив составляет 25,1 км³, из них на Неман приходится 21,0 км³. С осадками залив ежегодно получает 1,0 км³, с испарением теряет 0,5 км³. Таким образом, ежегодно объём получаемой заливом воды превышает его собственный объём в четыре раза. Поэтому вода в заливе пресная, а её уровень превышает уровень моря на 12–15 см. Излишки воды через пролив сбрасываются в море.

Калининградский залив (Вислинский залив — в Польше) расположен у южного берега Балтийского моря (крайняя западная точка России — 19°38′ в.д.). Акватория Калининградского залива делится между Россией (Калининградская область) и Польшей, при этом 56,2 % относятся к России. Залив имеет длину 91 км, а ширина изменяется от 2 до 11 км, площадь 838 км². Береговая линия имеет длину 270 км, из них 159 км принадлежат Российской Федерации, а 111 км относятся к Польше. Фактически Калининградский залив является лагуной и почти закрытым водоемом. Залив отделен от моря песчаной Балтийской (Вислинской) косой до 60 км длиной. Обмен воды происходит через узкий Балтийский пролив, ширина которого составляет 400 м, длина 2 км, средняя глубина 8,8 м (вдоль фарватера 10–12 м).

В залив впадают реки Нogat (правый рукав Вислы), Преголя, Прохладная и другие. На формирование гидрологического режима Калининградского (Вислинского) залива оказывают влияние колебания уровня Балтийского моря и речной сток. Основной приток пресных вод дают реки Преголя и два рукава реки Висла. Солёность составляет у входа в Балтийский пролив 2–6 г/кг, тогда как прибрежные поверхностные воды моря имеют солёность около 7,3 г/кг [Chubarenko, Margonski, 2008]. Средняя глубина залива составляет 2,7 м, максимальная 5,2 м (за исключением искусственного фарватера — Калининградского морского канала, где она составляет 9–10 м). Уровень водной поверхности всего на 5–8 см выше среднего уровня воды в Балтийском море. Относительный уровень залива по оценочным значениям (относительно условного минимального уровня воды) $1,0 \pm 0,3$ м, размах колебаний 0,7–1,3 м [Есюкова, 2013]. По этой причине морские воды легко проникают в залив. Форма залива способствует развитию значительных ветровых сгонно-нагонных колебаний уровня. Сила и направление господствующих ветров определяют и течения в заливе. При нагонных ветрах северного и северо-западных направлений морская вода проникает в залив и движется вдоль берегов против часовой стрелки. Юго-восточные и южные ветра вызывают течение в противоположном направлении — водные массы движутся по часовой стрелке и вытекают из залива через Балтийский пролив. Среднестатистические данные о режиме входных течений (заток морских вод) и выходных течений (выток вод из залива) представлены в работе [Гидрометеорологический..., 1971]. Однонаправленные входные или выходные течения составляют 74,9 %; 13,4 % — двухслойные течения (заток в придонном слое и выток в приповерхностном) и 13,4 % — двунаправленные [Chubarenko, Margonski, 2008]. В зимние месяцы воды залива сковываются льдом, в тёплое время года — интенсивно «цветут».

Ещё один объект нашего спутникового мониторинга — Финский залив.

Финский залив — залив в восточной части Балтийского моря, омывает берега России и Эстонии на востоке и юге, и Финляндии на севере. Длина залива 420 км, ширина 120 км, ширина у входа 70 км. Глубина от 100 м у входа в залив до 5–7 м и менее в восточной части (так называемая Невская губа). Площадь Финского залива — 29,5 тыс. км². Залив мелководен. Средняя глубина его — 38 м, максимальная глубина 115 м, глубина Невской губы восточной части Финского залива — 2,5–6 м. По дну Невской губы для прохода судов прорыт фарватер. В залив впадают реки Нева, Луга, Нарва, Сестра. В связи с большим притоком пресной воды из рек, особенно из Невы, вода залива имеет очень небольшую солёность (с 0,2 до 5,8 г/кг у поверхности и с 0,3 до 8,5 г/кг у дна). Уровень воды под влиянием нагонных ветров и др. причин может сильно подниматься, что вызывает наводнения, особенно в Невской губе. Для защиты Санкт-Петербурга от наводнений сооружена дамба, пересекающая Невскую губу. Финский залив скован сплошными морскими льдами с конца ноября до конца марта. Сайменским каналом соединён с оз. Сайма.

В заливе много островов: Берёзовые острова, Кокор, Нерва, Сескар, архипелаг Большой Фискаар, Котлин (Невская губа), Рондо, Соммерс, Гогланд, Мощный.

Для южного берега Финского залива характерно сочетание крупных антропогенных объектов — агрокомплексов, атомной электростанции, сети портов и уникальных природных и исторических уголков — орнитологический заказник Лебяжий,

Кургальский, Гостилицкий и Котельский заказники. Главные порты России в Финском заливе: Санкт-Петербург, Выборг и Усть-Луга.

Балтийское море имеет важное транспортное значение для России. Огромную роль в экспорте нефти из России играют порты и нефтяные терминалы на Балтийском море. Главным нефтяным терминалом здесь традиционно был латвийский порт Вентспилс, затем выросло значение Таллиннского порта, хотя к нему нефть нужно транспортировать по железной дороге, тогда как к Вентспилсу подходит трубопровод. Россия сократила транзит нефти через страны Балтии. Нефтяной транзит через эти страны или любые другие государства будет действовать только как дополнительный маршрут для случаев, с которыми российские терминалы не смогут справиться самостоятельно. Приморск — самый крупный балтийский нефтяной терминал, находящийся на российской территории. В 2008 г. из Приморска было отправлено 75,6 млн т нефтепродуктов, из Высоцка — 13,6 млн т, с Петербургского нефтяного терминала — 14,4 млн т. В ноябре 2000 г. компания «Лукойл» открыла нефтяной терминал в Калининграде. В 2001 г. компания построила ещё один терминал в Калининграде с объявленной пропускной способностью 2,5 млн т. Эти терминалы, по оценкам, способны перегружать до 3–5 млн т нефти ежегодно. С 2004 г. на шельфе Балтийского моря в Калининградской области началась добыча нефти на платформе D-6 «Лукойл» и её транспортировка по подводному трубопроводу на материк [Зонн и др., 2015a].

Морской газопровод “Nord Stream” («Северный поток») представляет собой транспортную систему, предназначенную для экспорта природного газа из России в Германию и в Европейский Союз через акваторию Балтийского моря (от компрессорной станции ОАО «Газпром» вблизи бухты Портовая в Выборгском районе Ленинградской области до приёмного терминала вблизи населённого пункта Любмин в районе Грайфсвальда на северном побережье Германии). Трасса газопровода протяжённостью более 1220 км пересекает исключительные экономические зоны пяти государств — России, Финляндии, Швеции, Дании и Германии, а также воды территориальных морей России, Германии и Дании [Гришин, Костяной, 2012, 2013; Grishin, Kostianoy, 2012].

Морской газопровод “Nord Stream” стал новым маршрутом поставок газа в Европу, позволяющим напрямую соединить крупнейшие российские газовые месторождения с Западной Европой. Строительство первой нитки газопровода пропускной способностью 27,5 млрд м³ газа в год началось в апреле 2010 г. и было завершено в июне 2011 г. Поставки газа в Европу начались 8 ноября 2011 г. Строительство второй нитки началось в мае 2011 г. и закончилось в последнем квартале 2012 г. После выхода газопровода на полную эксплуатационную мощность в четвёртом квартале 2012 г. он может ежегодно поставлять 55 млрд м³ газа на протяжении как минимум 50 лет [Гришин, Костяной, 2012, 2013; Grishin, Kostianoy, 2012].

Балтийское море богато рыбой и морепродуктами, в Калининградской области ведётся добыча янтаря. В Ленинградской и Калининградской областях на побережье Балтийского моря находится несколько курортных зон местного значения: Сестрорецк, Зеленогорск, Светлогорск, Пионерский, Зеленоградск, Куршская Коса [Зонн и др., 2015a].

3.2. НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

3.2.1. Юго-Восточная Балтика

Задача по выявлению зон устойчивого нефтяного загрязнения морей, и, в частности, Балтийского моря, является чрезвычайно сложной, поскольку требует многолетних морских, самолётных и спутниковых наблюдений. Такие наблюдения в Балтийском море проводятся более 30 лет, однако нерегулярно по времени и неравномерно по площади, а их количество сильно варьируется между разными странами Балтики [HELCOM, 2016a; Kostianou, Lavrova, 2014]. В результате картина нефтяного загрязнения создается неточная, если мы будем анализировать ежегодные сводки HELCOM о детектировании нефтяных пятен воздушными (самолётами и вертолётами) средствами. На рис. 3.2 представлена сводка таких наблюдений за 2015 г., которая не показывает нефтяных загрязнений в Центральной Балтике и на акваториях Российской Федерации в Финском заливе и в Юго-Восточной Балтике (Калининградская область). Последнее объясняется тем, что с 1993 г. РФ не осуществляет самолётных наблюдений нефтяного загрязнения балтийских вод [HELCOM, 2015]. Следует отметить, что в РФ не ведутся регулярные самолётные наблюдения нефтяного загрязнения и других морей РФ, даже тех районов, где ведётся добыча, перевалка и транспортировка нефти, а также существует интенсивное судоходство [Костяной и др., 2009].

Для того чтобы получить более полное представление о нефтяном загрязнении Балтийского моря, с 2004 г. мы стали строить сводные многолетние карты нефтяного загрязнения, сначала по данным HELCOM (рис. 3.3), а затем по собственным данным анализа спутниковых радиолокационных наблюдений (рис. 3.4). На рис. 3.3 представлена сводная карта нефтяных пятен, обнаруженных в Балтийском море в 1989–2002 гг. по данным воздушных наблюдений, ежегодно публикуемым HELCOM. Сводная картина наблюдений за 14 лет сразу «прорисовала» основные судоходные трассы в Балтийском море, а также подходы к основным портам и нефтяным терминалам всех стран Балтики. Этот факт однозначно ставит судоходство на первое место среди источников нефтяного загрязнения Балтийского моря. Причём виновниками нефтяного загрязнения являются суда различных типов и назначения, включая пассажирские, рыболовные и военные, а не только танкеры, как это иногда принято считать. Снова обращают на себя внимание абсолютно «чистые» воды РФ в Финском заливе и в Юго-Восточной Балтике, что объясняется отсутствием самолётных наблюдений с 1993 г.

Впервые регулярный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения Юго-Восточной Балтики стал вестись с 2004 г. (и по настоящее время — декабрь 2016 г.) в рамках производственного экологического мониторинга нефтяного месторождения «Кравцовское» (морская ледостойкая стационарная платформа (МЛСП) D-6) ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» и ряда российских и международных научных проектов [Булычева, 2012; Булычева, Костяной, 2011, 2014; Булычева и др., 2016а, б; Гинзбург и др., 2015; Костяной, Булычева, 2014; Костяной и др., 2012; Лаврова и др., 2011а; Немировская и др., 2011; Bulychева et al., 2014, 2015, 2016; Kostianou, Lavrova, 2014; Kostianou et al., 2004а, 2005, 2006, 2015; Lavrova et al., 2014а, б]. В рамках мониторинга, в частности, выполняется радиолокационный контроль появления и распространения нефтяных пятен на поверхности моря по оперативным данным со спутников, оснащённых радаром с синтезированной апертурой (РСА).

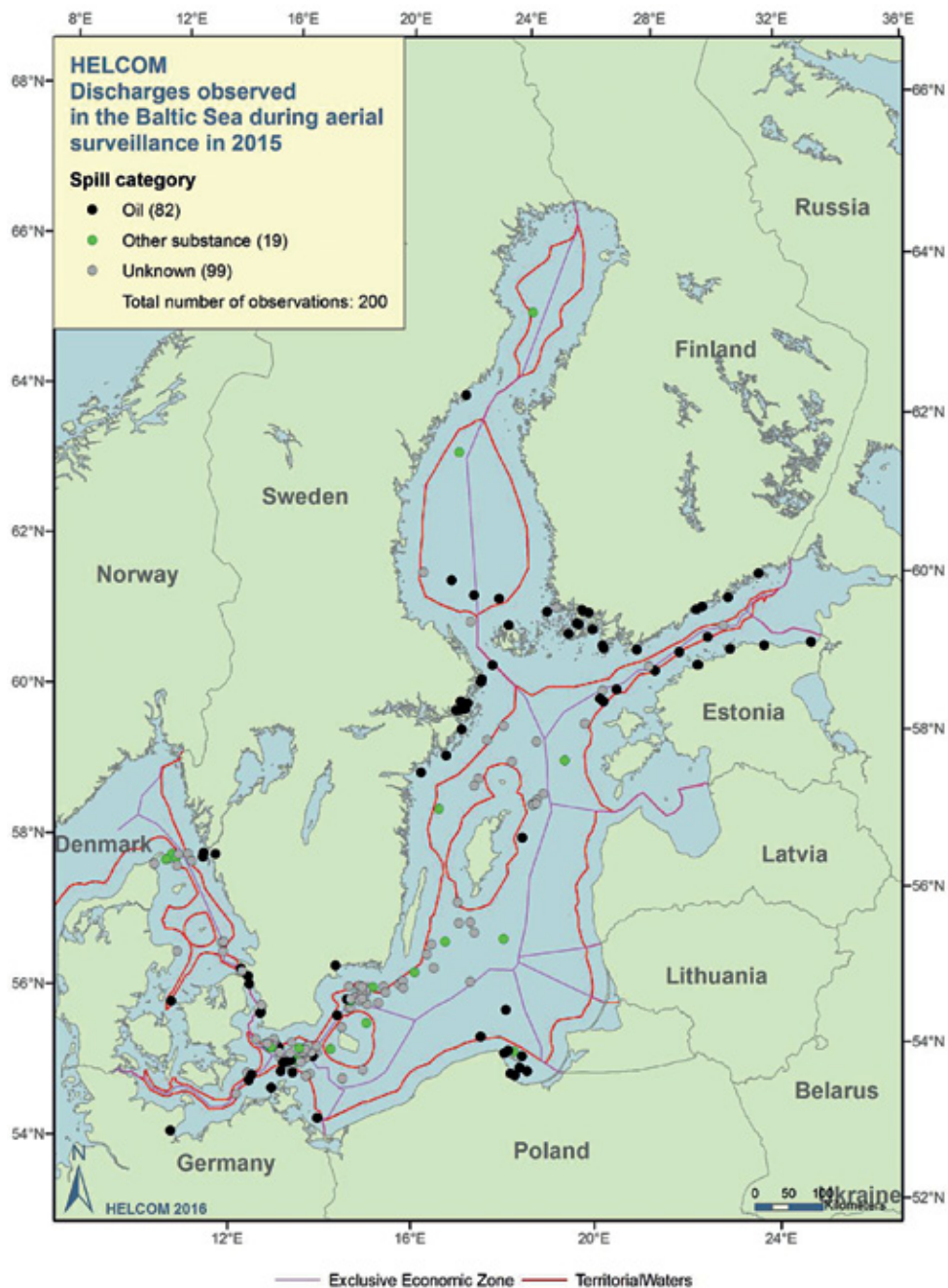


Рис. 3.2. Положение нефтяных пятен (82, чёрные точки), пятен других веществ (19, зелёные точки) и пятен неизвестного состава (99, серые точки), выявленных в Балтийском море в 2015 г. по данным воздушных наблюдений [HELCOM, 2016a]. Красная линия — граница территориальных вод, фиолетовая — граница исключительных экономических зон

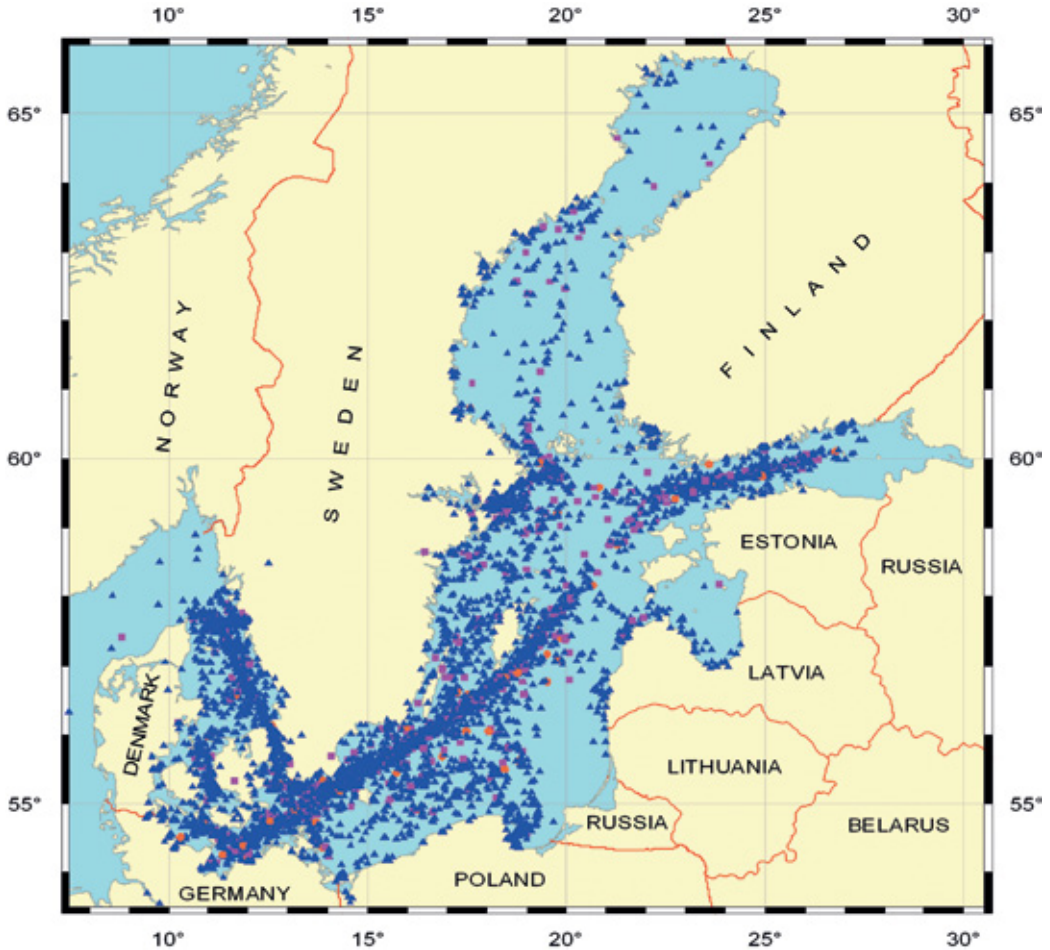
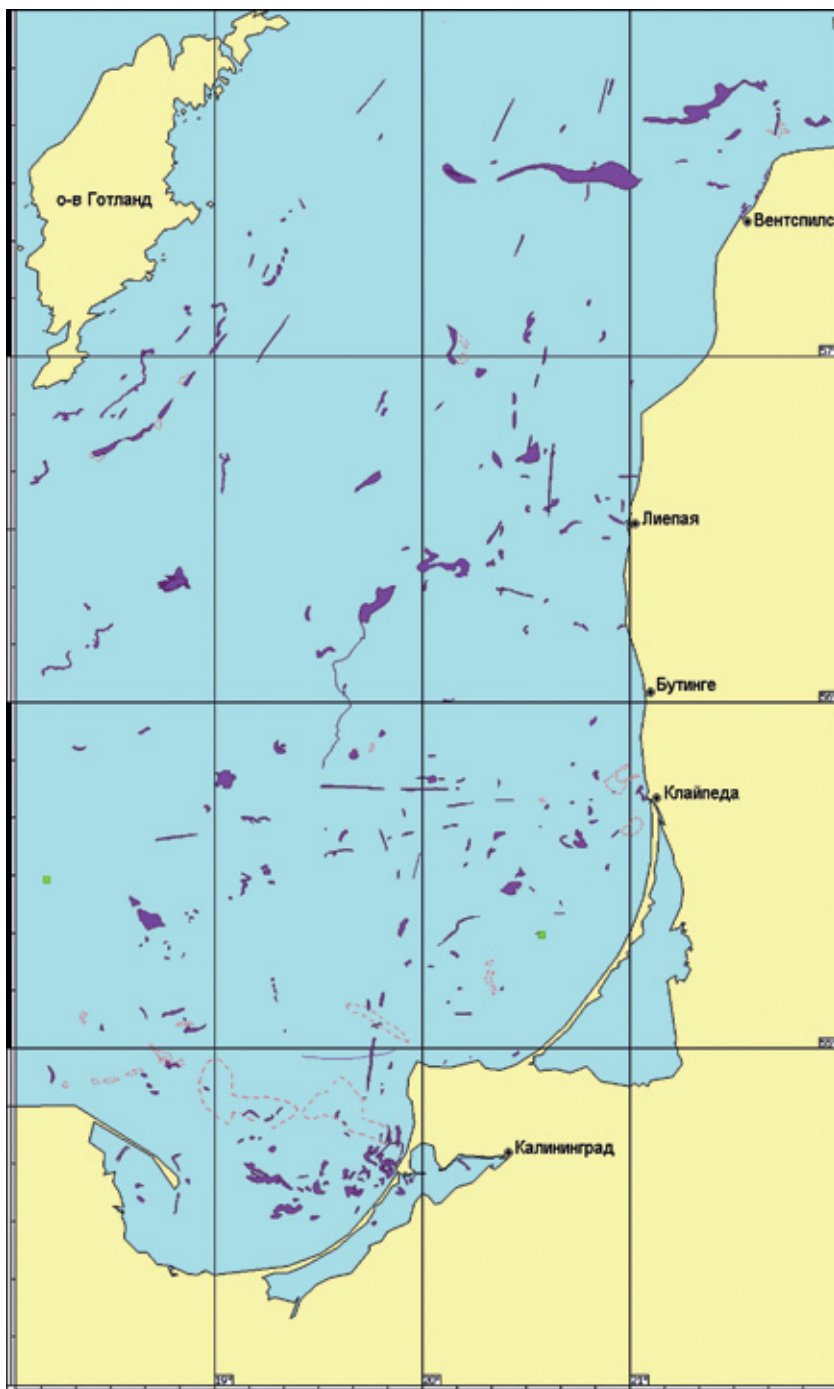


Рис. 3.3. Карта нефтяных пятен, обнаруженных в Балтийском море в 1989–2002 гг. [Kostianoy et al., 2005]

Благодаря широкому охвату радиолокационных изображений (до 400×400 км), район спутниковых наблюдений захватывает не только акваторию РФ, но и полностью или частично воды Германии, Дании, Польши, Литвы, Латвии, Эстонии и Швеции. Подчеркнём, что это единственный в РФ оперативный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения, который ведётся практически ежедневно на протяжении 13 лет.

В 2004 г. мы стали строить первые сводные карты нефтяного загрязнения Юго-Восточной Балтики на основе анализа РЛИ, полученных в ходе производственного экологического мониторинга нефтяного месторождения «Кравцовское», которые отличались от карт HELCOM тем, что представляли реальный размер и форму каждого нефтяного пятна. На рис. 3.4 представлена сводная карта нефтяных пятен, обнаруженных нами за период мониторинга с июля 2004 г. по ноябрь 2005 г.



Р и с. 3.4. Карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в результате анализа РЛИ ASAR Envisat и SAR Radarsat-1 с июля 2004 г. по ноябрь 2005 г. [Kostianoy et al., 2006]

Всего с 1 июля 2004 г. по 30 ноября 2005 г. было получено, обработано и проанализировано 230 радиолокационных изображений со спутника Envisat и 17 со спутника Radarsat-1, на которых в общей сложности было выявлено 274 отдельных пятна нефтепродуктов на поверхности юго-восточной части Балтийского моря (см. рис. 3.4). Как и следовало ожидать, массив пятен четко вырисовывает основные судоходные трассы в юго-восточной части Балтийского моря, направленные к портам Вентспилс, Лиепая, Клайпеда, Калининград, а также трассу вдоль Готланда (см. рис. 3.3 и 3.4).

По предложенной нами методике сводные карты нефтяного загрязнения Юго-Восточной Балтики продолжали строиться ежегодно по мере накопления проанализированных радиолокационных данных и публиковаться в отчетах компаний ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» (<http://www.lukoil-kmn.com/allmonitoring>), ПАО «ЛУКОЙЛ» (http://www.lukoil.ru/static_6_5id_2135_.html), а также в научных статьях [Булычева, Костяной, 2011, 2014; Булычева и др., 2016а, б; Bulycheva et al., 2014, 2015, 2016; Kostianoy et al., 2005, 2006, 2015]. Для выявления нефтяного загрязнения на морской поверхности в Юго-Восточной Балтике в 2004–2016 гг. использовались радиолокационные изображения (РЛИ) со спутников Envisat Европейского космического агентства (ESA) (до апреля 2012 г.), Radarsat-1 Канадского космического агентства (CSA) (до марта 2013 г.), Radarsat-2 компании МакДональд, Делтавилер и Партнеры (MDA, Канада), COSMO-SkyMed-1, -2, -3, -4 Итальянского космического агентства (ASI), TerraSAR-X Германского центра авиации и космонавтики (DLR), а также Sentinel-1A и Sentinel-1B Европейского космического агентства (ESA). Интервал между двумя последовательными съёмками составлял от 12 до 72 ч, а с появлением спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B в отдельные дни интервал составлял от 7 до 15 мин. Хорошо известно, что при скоростях приводного ветра менее 2 м/с и более 10 м/с спутниковая радиолокация не выявляет нефтяного загрязнения. Поэтому все приведённые ниже результаты соответствуют нижней оценке реального нефтяного загрязнения морской поверхности. В 2004–2015 гг. в рамках производственного экологического мониторинга нефтяного месторождения «Кравцовское» приём и обработка РЛИ осуществлялись норвежским спутниковым оператором Kongsberg Satellite Services (KSAT) в Тромсё, а в рамках национальных и международных научных проектов — в рамках научных контрактов с Европейским космическим агентством.

На рис. 3.5 представлена гистограмма РЛИ, полученных с различных спутников в 2004–2015 гг. Она показывает, что количество снимков менялось примерно от 200 до 100 в год, при этом мы считали, что 200 РЛИ в год вполне достаточно для определения основных характеристики нефтяного загрязнения в Юго-Восточной Балтике, учитывая чрезвычайно высокую стоимость оперативных РЛИ (примерно от 1000 до 4000 дол. США за один снимок в зависимости от спутника). Именно высокая стоимость РЛИ стала причиной неуклонного снижения количества снимков, заказываемых для мониторинга (см. рис. 3.5). С появлением радиолокационных спутников Sentinel-1A в 2014 г. и Sentinel-1B в 2016 г. и политикой Европейского космического агентства по расширению бесплатного предоставления спутниковых данных появилась возможность получать до 200–240 бесплатных РЛИ по изучаемому району, но не в оперативном режиме.

За период спутниковых наблюдений с 2004 по 2015 г. всего было проанализировано 1946 РЛИ (см. рис. 3.5), на которых было идентифицировано 1232 нефтяных пятна (рис. 3.6) из них 638 в районе мониторинга (рис. 3.7), который включал

исключительные экономические зоны (ИЭЗ) России, Литвы и частично Польши [Булычева и др., 2016а, б; Bulycheva et al., 2016].

Анализ формы нефтяных пятен показал, что основным источником загрязнения поверхности моря являются движущиеся суда, которые оставляют за собой узкие пятна протяжённой формы. Наиболее загрязнённым районом Юго-Восточной Балтики остаётся район к западу от Самбийского полуострова и на подходе к Калининградскому каналу (в районе Балтийска) (см. рис. 3.7). Рейд порта Балтийск и якорная стоянка вблизи него является наиболее загрязнённой акваторией российского сектора Юго-Восточной Балтики [Булычева, 2012; Булычева, Костяной, 2011, 2014; Булычева и др., 2016а, б; Костяной и др., 2012; Лаврова и др., 2011а; Bulycheva et al., 2014, 2015, 2016; Kostianoy, Lavrova, 2014; Lavrova et al., 2014b].

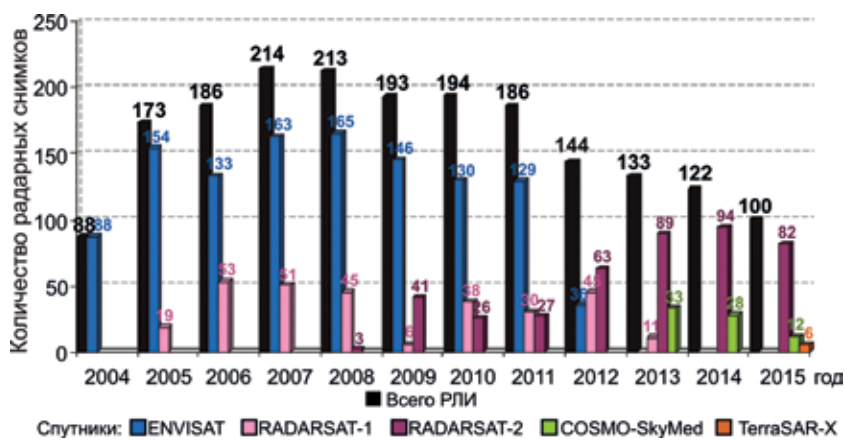


Рис. 3.5. Количество РЛИ, полученных и проанализированных со спутников, оснащённых РСА, с 2004 по 2015 г. [Булычева и др., 2016б]

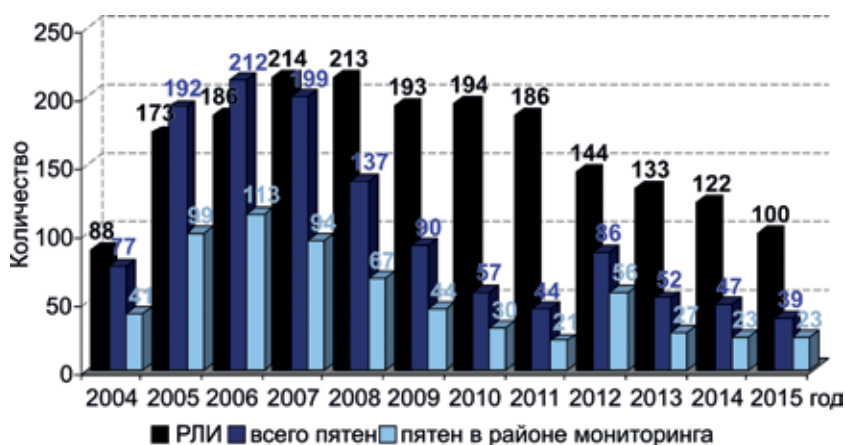
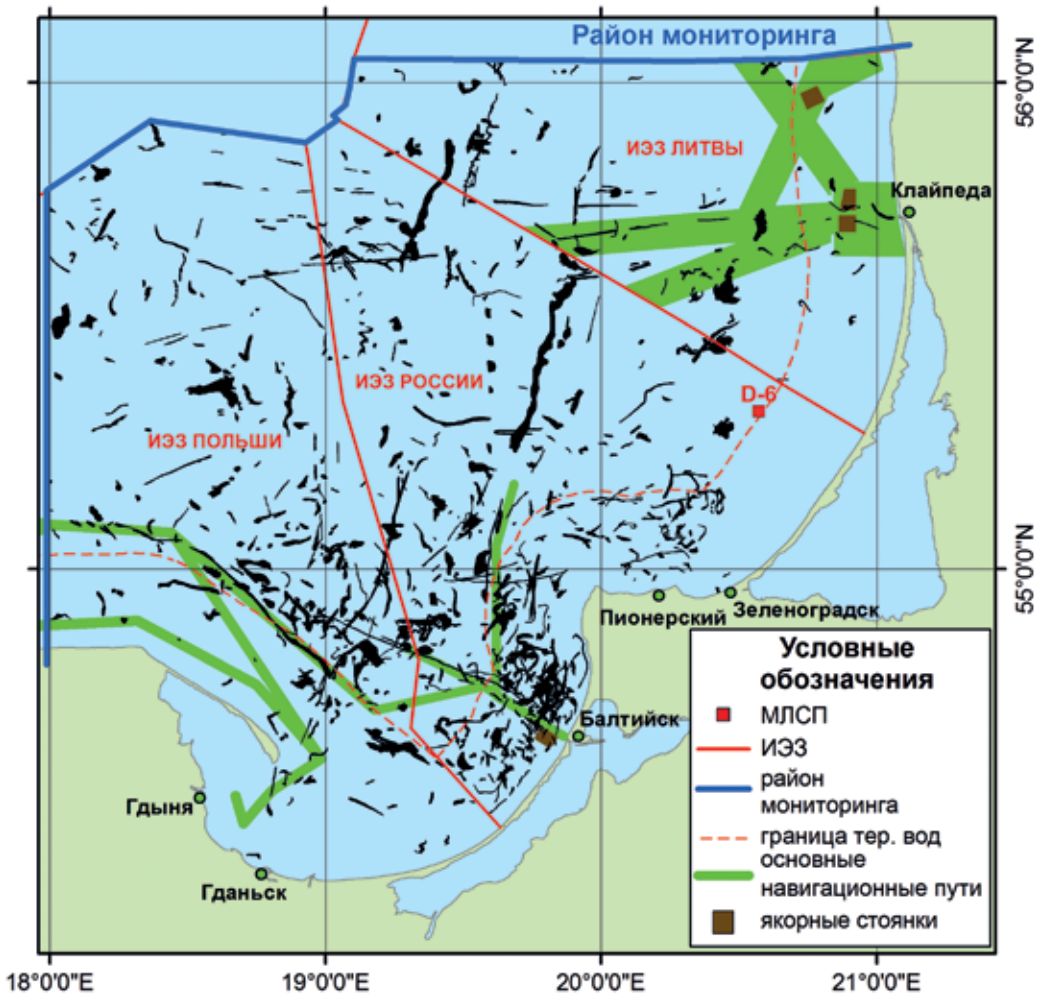


Рис. 3.6. Количество проанализированных РЛИ и обнаруженных на них нефтяных пятен с 12.06.2004 г. по 31.12.2015 г. [Булычева и др., 2016б]



Р и с. 3.7. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ в районе экологического мониторинга Кравцовского нефтяного месторождения в 2004–2015 гг. [Булычева и др., 2016б]

Нефтяные пятна концентрируются и вытягиваются вдоль основных судоходных трасс, идущих из Гдыни и Гданьска (Польша) на северо-запад и на северо-восток, из Калининградского канала (Россия) на северо-запад и на север, из Клайпеды (Литва) на запад и на юго-запад (см. рис. 3.7).

Сравнительный анализ концентрации нефтяных пятен и плотности сигналов AIS (системы автоматической идентификации судов) показал, что существующее смещение нефтяных пятен от основной судоходной трассы в районе порта Балтийск к северо-востоку является следствием преобладающих ветров в Юго-Восточной Балтике и поверхностных течений в Гданьском заливе [Булычева и др., 2016а; Vulycheva et al., 2015].

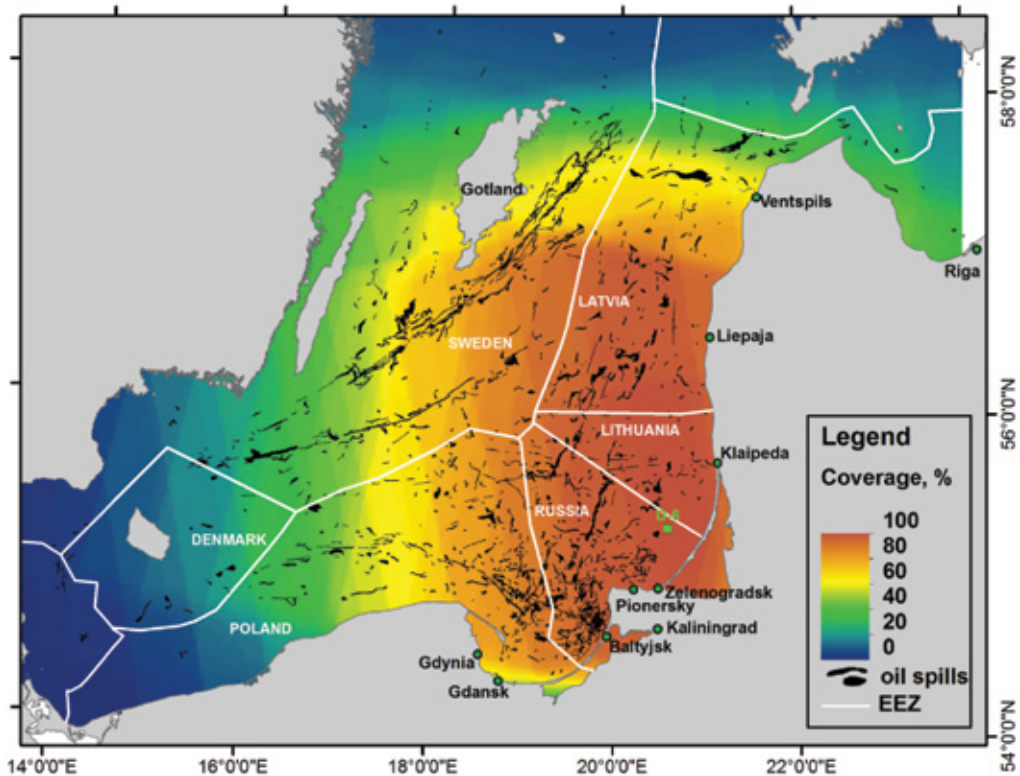


Рис. 3.8. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ в Юго-Восточной Балтике в 2004–2015 гг. [Bulycheva et al., 2016]. Цвет фона показывает степень покрытия данной акватории радиолокационными изображениями. Белые линии показывают границы ИЭЗ балтийских стран

В отдельные годы (2006–2009, 2012) наблюдалось скопление нефтяных пятен к северу от Самбийского полуострова вблизи морского порта Пионерский (см. рис. 3.7), где уровень судоходства очень низкий, о чем свидетельствует маленькая плотность сигналов AIS. Это объясняется сбросом нефтепродуктов с маломерных судов, в основном рыболовных, не оснащённых оборудованием AIS [Bulycheva et al., 2014]. За 13-летний период ни одного случая нефтяного загрязнения от МЛСП D-6 зафиксировано не было.

Как было показано выше, около 600 нефтяных пятен было зафиксировано в 2004–2015 гг. за пределами района мониторинга. На рис. 3.8 представлена сводная карта всех нефтяных пятен, зарегистрированных на всех полученных и обработанных РЛИ, включая воды Германии, Дании, Польши, Литвы, Латвии, Эстонии и Швеции (Bulycheva et al., 2016). В качестве цветной подложки показана степень покрытия данной акватории Балтики радиолокационными изображениями, которая существенно неоднородна, что объясняется фокусировкой РЛ-съёмки на район нефтяной платформы D-6 и циклической геометрией РЛ-съёмки, отличающейся для каждого спутника. В связи с этим, необходимо понимать, что концентрация или отсутствие

нефтяных пятен на той или иной акватории частично объясняется максимальной или минимальной степенью покрытия радиолокационными изображениями.

Анализ полученной карты выявил концентрацию нефтяных пятен (кроме выявленных выше) на подходах к портам Лиепая, Вентспилс и Рига (Латвия), а также четко прорисовал основные судоходные трассы восточнее и южнее острова Готланд (Швеция), еще одну трассу чуть севернее границы ИЭЗ Швеции и Польши и две судоходные трассы, ведущие из Клайпеды и Гданьского залива на запад (см. рис. 3.8). Для подтверждения сделанного вывода и большей наглядности в качестве подложки для сводной карты нефтяных пятен была взята плотность сигналов AIS, которая фактически красными линиями прорисовывает основные судоходные трассы в исследуемом районе Балтийского моря (рис. 3.9). Анализ этой карты показывает, что достаточно большое количество нефтяных пятен «ложится» точно на судоходные трассы с большой интенсивностью движения, однако не менее значительное число пятен остаётся в «зелёной» зоне, где интенсивность судоходства минимальна.

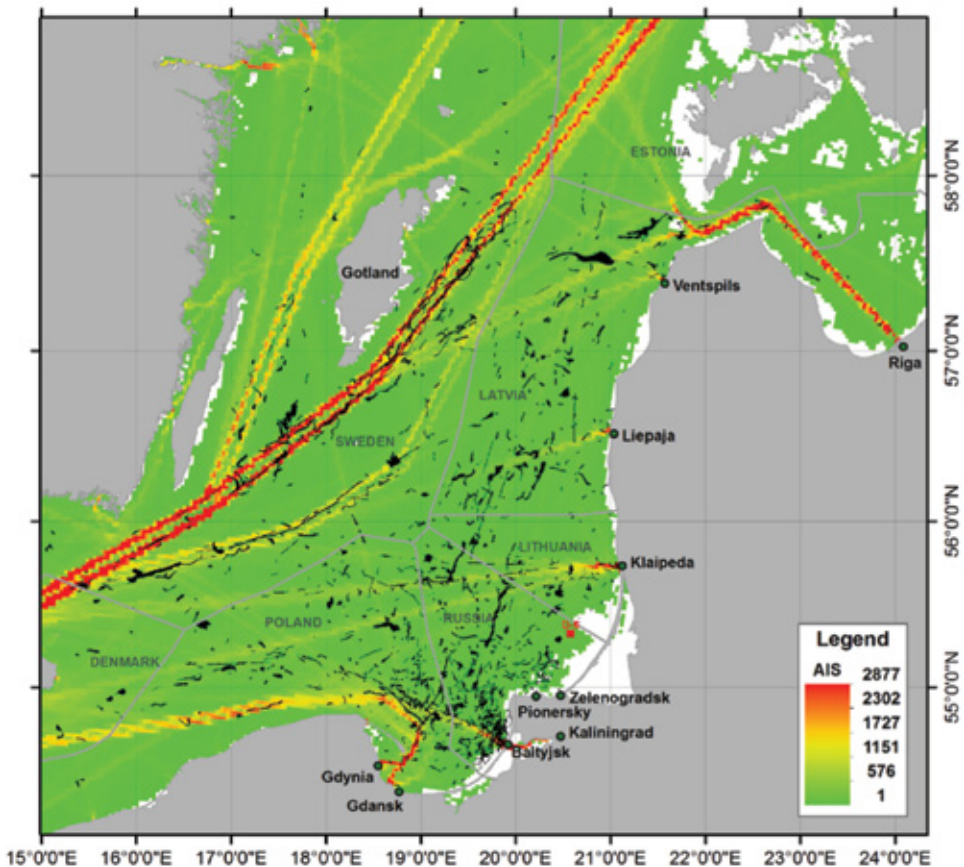


Рис. 3.9. Сводная карта всех нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ в Юго-Восточной Балтике в 2004–2015 гг. [Bulycheva et al., 2016]. Цвет фона показывает плотность сигналов AIS по данным HELCOM за 2011 г. Серые линии показывают границы ИЭЗ балтийских стран

Полученные сводные результаты анализа нефтяного загрязнения Юго-Восточной Балтики позволили выявить районы, наиболее подверженные нефтяному загрязнению, что позволяет более точно сфокусировать спутниковые, авиационные и морские средства контроля окружающей среды, имеющиеся в странах балтийского региона. Для Российской Федерации проводимый спутниковый мониторинг Юго-Восточной Балтики имеет чрезвычайно важное значение ещё и с точки зрения: 1) разграничения ответственности за наблюдаемое загрязнение; 2) трансграничного переноса загрязнений между сопредельными странами; 3) добычи нефти на платформе D-6, риска возможной аварии и потенциальных негативных последствий для экологии региона; 4) современной сложной геополитической ситуации в данном регионе.

3.2.2. Финский залив

Экологическое состояние Финского залива вызывает серьёзное беспокойство учёных Финляндии, Швеции, Эстонии и России в связи с ключевой ролью Финского залива в экологическом состоянии восточной части бассейна Балтийского моря. Особенное беспокойство вызывают проекты строительства нефтеналивных портов в Финском заливе. В период с января 2009 г. по апрель 2012 г., включая время строительства газопровода Северный поток — с мая 2010 по апрель 2012 г. — проводился комплексный спутниковый мониторинг для контроля состояния поверхности Финского залива.

Основным средством дистанционного контроля состояния морской поверхности и оценки степени загрязнённости являлись радиолокаторы с синтезированной апертурой, установленные на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) ERS-2 и Envisat Европейского космического агентства. Для уверенной интерпретации радиолокационных изображений (РЛИ) привлекались данные сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra, MERIS ИСЗ Envisat и AVHRR ИСЗ NOAA видимого и инфракрасного диапазонов, несущие информацию о полях температуры поверхности моря, взмученности вод, содержании хлорофилла, ледяном покрове и мезомасштабной динамике вод. Дополнительно использовались данные сканирующих радиометров ETM+ ИСЗ Landsat-7 и TM Landsat-5.

Обобщённая карта-схема антропогенных загрязнений (представлены реальные формы и размеры пятен) акватории Финского залива, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации за 2009–2012 гг., представлена на рис. 3.10.

Как видно из карты, в акватории Финского залива можно выделить три района, подверженных наибольшему загрязнению:

- I. Участок акватории Балтийского моря вблизи входа в Финский залив.
- II. Центральная часть Финского залива, восточнее судоходной трассы Хельсинки — Таллинн.
- III. Невская губа (см. рис. 3.13).

Загрязнениям в каждом из вышеперечисленных районов присущи свои отличительные черты.



Рис. 3.10. Сводная карта нефтяных пятен в Финском заливе Балтийского моря, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации в 2009–2012 гг.

I. Спутниковая съёмка выявила высокий уровень загрязнённости вдоль судоходных трасс вблизи входа в Финский залив. Основными источниками антропогенных загрязнений морской поверхности в этом районе являются сбросы вод, содержащих нефтепродукты, с движущихся судов. При этом суда могут сбрасывать воды, содержащие нефтепродукты, на протяжении нескольких десятков километров своего пути. На рис. 3.11 приведены характерные примеры радиолокационного проявления нефтяного загрязнений такого типа. На рис. 3.11а представлен фрагмент ASAR Envisat изображения, полученного 6 июня 2009 г. северо-западнее о. Сааремаа в условиях слабого ветра и небольшого волнения. С двух судов, следующих один за другим из Финского залива, были произведены сбросы вод, содержащих нефтепродукты. Совокупная длина тонкой сликовой полосы за судами составила 88,6 км. Подобные ситуации наблюдаются регулярно.

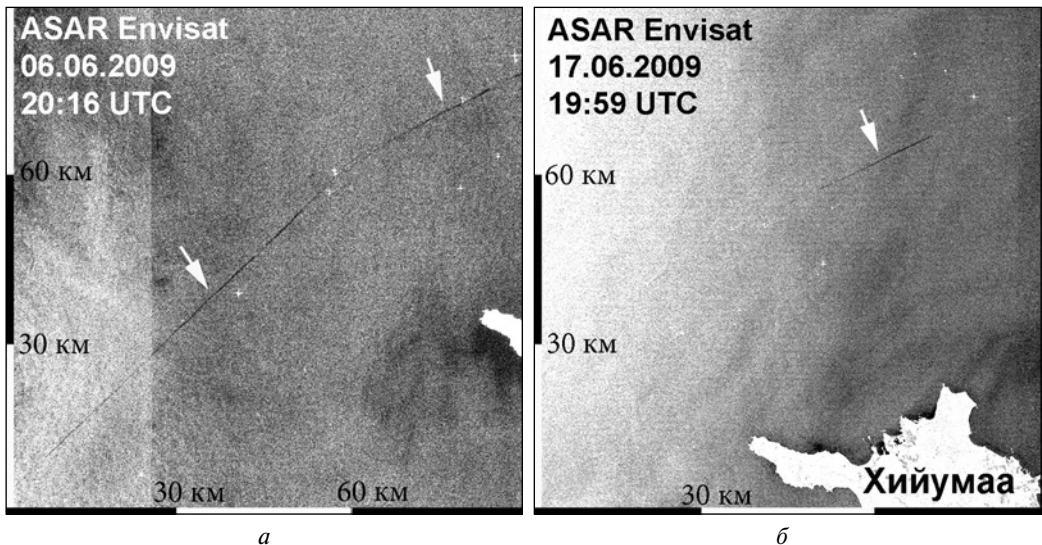


Рис. 3.11. Фрагменты РЛИ ASAR Envisat: а — два свежих сброса с движущихся судов: совокупная длина — 88,6 км; б — свежий сброс с движущегося судна: длина — 18,5 км

Чаще всего незаконные сбросы нефтепродуктов детектируются в районе судодной трассы севернее острова Хийумаа. В частности, на РЛИ от 17 июня 2010 г. (рис. 3.11б) за судном, которое выделяется в виде яркой белой точки на конце сликовой полосы, выявлено загрязнение морской поверхности, растянувшиеся на 18,5 км. Сужение полосы к юго-западу свидетельствует о том, что судно, сбрасывающее нефтесодержащие воды, движется в этом направлении.

II. В центральной части Финского залива на РЛИ выявляются плёночные загрязнения меньшей протяжённости, но значительно большей площади. Такие признаки характерны либо для сбросов с неподвижных судов, когда растекание нефтесодержащих пленок происходит более или менее равномерно во все стороны, благодаря чему пятно принимает округлую форму, либо для достаточно «старых» разливов, подвергшихся частичной деградации вследствие воздействия локальных течений и приповерхностного ветра. Зачастую осложняющим фактором в данном случае является неустойчивая стратификация пограничного слоя море-атмосфера, дающая неровный, ячеистый фон на изображении.

Характерные примеры загрязнений, выявленных в центральной части Финского залива представлены на рис. 3.12. Сброс с неподвижного судна, выявленный на РЛИ от 22 июля 2010 г., представлен на рис. 3.12а. Площадь загрязнения, которое распространялось под действием умеренного южного ветра и вдольберегового северо-восточного течения, составила 6,27 км². Самое большое загрязнение, выявленное на РЛИ в период наблюдений 2009–2012 гг., было детектировано на РЛИ от 9 октября 2011 г., полученном над центральной частью Финского залива.

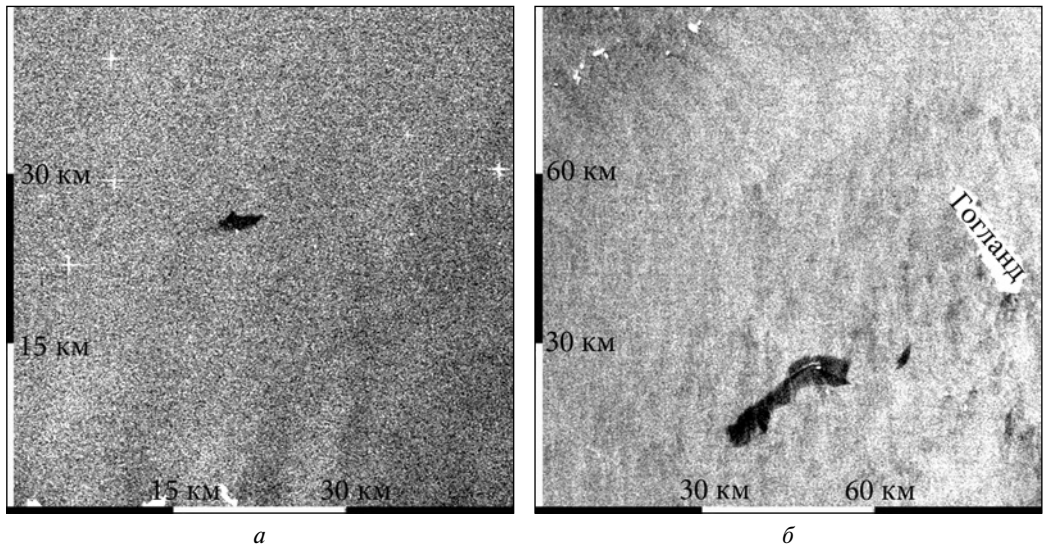
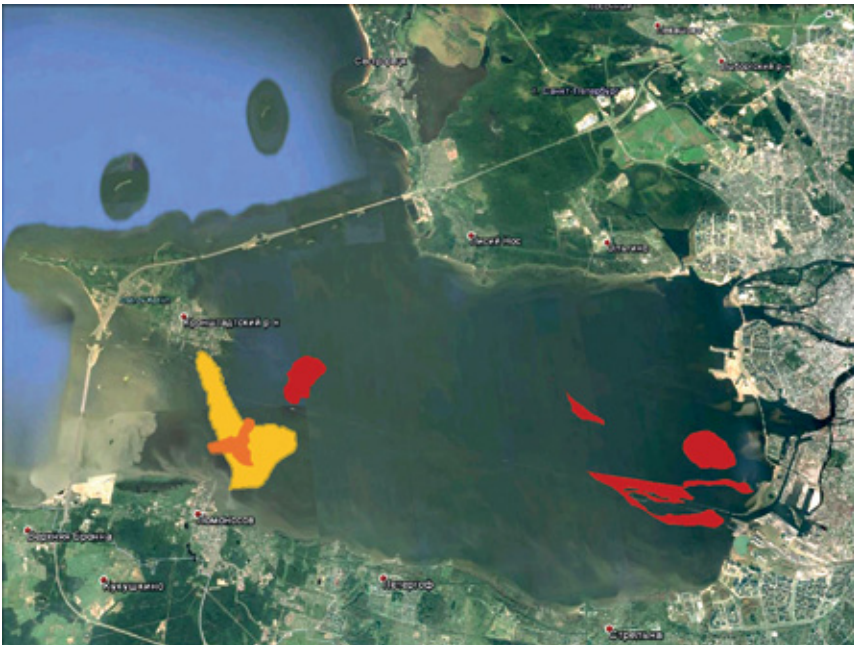


Рис. 3.12. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 22.07.2010 г. в 20:00 UTC (а). Сброс с неподвижного судна: площадь загрязнения 6,27 км². Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 09.10.2011 г. в 08:50 UTC (б). Самое большое загрязнение в Финском заливе за период наблюдений 2009–2012 гг. Площадь загрязнения — 28,5 км². Типичный случай «старого» разлива в виде характерной «гребёнки»

Фрагмент этого изображения представлен на рис. 3.12б. Нефте содержащее пятно расположено к юго-западу от о. Гогланд (Россия) и на 7 км южнее трассы газопровода Северный поток. В четырёх километрах к востоку от этого пятна расположено меньшее пятно, имеющее размеры примерно 3×1 км. Большое пятно представляет собой типичный случай «старого» разлива в виде характерной гребёнки, который подвергся частичной деградации: контраст между областью разлива и окружающей морской поверхностью невысок, форма пятна исказилась вследствие воздействия локальных течений и приповерхностного юго-юго-восточного ветра, скорость которого на момент радиолокационной съёмки составила 4 м/с. Площадь загрязнения на момент радиолокационной съёмки составила $28,5 \text{ км}^2$. Выявить судно, с которого произошёл сброс, не представляется возможным, поскольку загрязнение находилось в районе интенсивного судоходства, о чем свидетельствуют многочисленные яркие белые точки, соответствующие судам, которые идентифицируются на РЛИ на самом пятне загрязнения и вокруг него.

III. Невская губа — это восточная часть Финского залива между Кронштадтом и Санкт-Петербургом, в которую впадает река Нева. С остальной частью Финского залива Невская губа ранее сообщалась через два пролива у острова Котлин, именуемых Северными и Южными Воротами. В современном состоянии Невская губа отделена от Финского залива комплексом защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, вызываемых сильными западными ветрами, и является изолированным проточным водоёмом площадью около 330 км^2 (рис. 3.13).



Р и с. 3.13. Сводная карта пятен антропогенных загрязнений в Невской губе, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации в 2009–2012 гг.

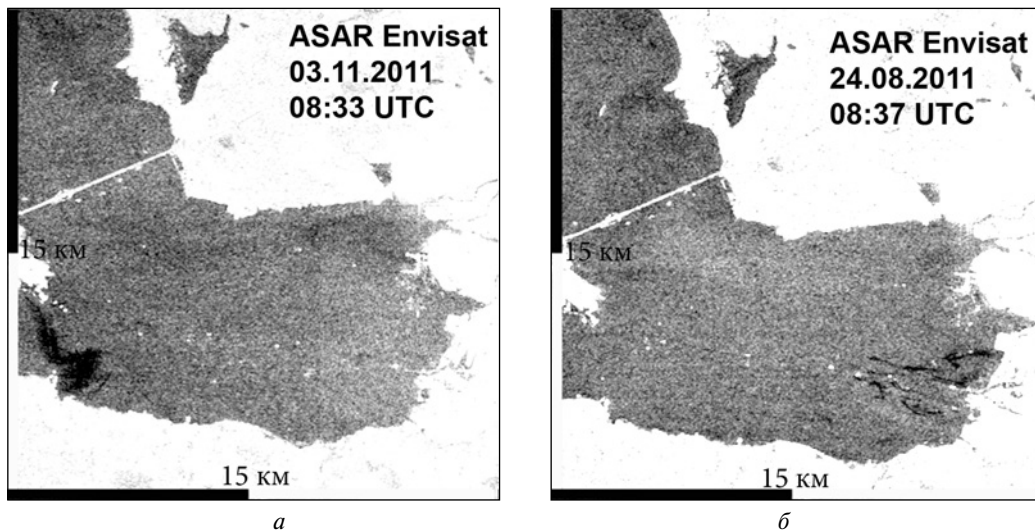


Рис. 3.14. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 03.11.2011 г. в 08:33 UTC (а). Загрязнение морской поверхности площадью $13,1 \text{ км}^2$ вблизи береговой черты поблизости от г. Ломоносов. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 24.08.2011 г. в 08:37 UTC (б). Стики антропогенного происхождения вблизи устья Невы. Совокупная площадь загрязнения $3,5 \text{ км}^2$

Основные плёночные загрязнения, выявленные на радиолокационных изображениях акватории Невской губы, обусловлены нефтесодержащими береговыми сбросами, как бытового так и промышленного характера. В частности, на нескольких РЛИ детектированы обширные сликовые области, локализованные в непосредственной близости от берега в районе г. Ломоносов (см. рис. 3.14а). Обширные слики регулярно наблюдаются и вблизи устья Невы (см. рис. 3.14б). Кроме того, достаточно крупные разливы выявлены вдоль судоходной трассы, ведущей к устью Невы.

Накопление антропогенных загрязнений в Невской губе оказывает негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону в силу ослабленного, благодаря наличию дамбы, водообмена с открытыми водами Финского залива. Ситуация усугубляется постоянно усиливающимся судоходством в этом районе. Для примера — в 2010 г. через Санкт-Петербург проследовало 5124 судна, 1168 из которых перевозили нефтепродукты. Ещё одним потенциальным источником экологической угрозы является Санкт-Петербургский нефтяной терминал с оборотом около 10 млн т в год (2015) и сам Большой порт Санкт-Петербурга с общим грузооборотом около 50 млн т в год (2015).

Основные характеристики наиболее значительных загрязнений морской поверхности нефтесодержащими плёнками, выявленных по спутниковым радиолокационным данным, приведены в табл. 3.1. За время проведения спутниковых наблюдений в акватории Финского залива выявлено 45 случаев существенных антропогенных плёночных загрязнений морской поверхности. Индивидуальная площадь пятен изменялась в пределах от $0,1$ до 30 км^2 . Совокупная площадь нефтесодержащих загрязнений морской поверхности составила 28; 57 и 116 км^2 в 2009, 2010 и 2011 гг. соответственно.

Т а б л и ц а 3.1. Основные характеристики наиболее значительных загрязнений морской поверхности в Финском заливе

Дата	Время (UTC)	Широта (с. ш.)	Долгота (в. д.)	Длина (км)	Площадь (кв. км)	Комментарий
2009.05.11	09:03	58°40'44,87"	21°30'22,85"	36,3	20	Протяжённый сброс вблизи входа в залив в районе о Са-аремаа
2009.05.24	08:50	59°14'29,33"	21°50'31,57"		0,54	Вход в Финский залив. Два округлых сброса, рядом с каждым виден корабль
		59°18'2,72"	21°58'40,47"		0,78	
2009.06.06	20:16	58°54'28,41"	21°15'16,44"	88,6	6,645	Тонкий и протяжённый сброс
2010.05.16	08:38	60° 6'44,71"	29° 1'9,18"		13,4	Крупный сброс, деформированный под влиянием приповерхностного ветра
2010.06.17	19:59	59°23'58,47"	22°11'32,51"	23,7	3,5	Свежий многократный сброс с движущегося судна
2010.07.15	08:53	59°52'54,00"	25°18'25,17"		9,7	Сброс в стадии деградации
2010.07.22	20:06	59°53'13,91"	25°44'58,23"		6,27	Свежий сброс с неподвижно-стоящего судна
2010.08.03	09:26	59°52'30,41"	25°18'15,71"	12,7	8,4	Вытянутый сброс-«гребёнка»
2010.10.03	08:36	60° 2'9,35"	28°31'24,66"		14,5	Сброс-«гребёнка»
2011.04.28	09:02	59°25'13,71"	22°51'18,99"	6 и 5	0,99	Два тонких сброса с изломами
2011.05.05	19:30	60° 4'22,61"	29°26'35,69"		0,68	Два слабо-контрастных слика
		60° 1'31,67"	29° 5'9,24"		1	
		59°59'18,00"	29° 4'31,19"		3,9	Слик, обусловленный береговыми стоками
2011.05.10	19:44	59°53'14,13"	25°21'17,36"	7,94 и 6,96	2,3	Тонкий искривлённый сброс
2011.05.24	19:43	59°57'52,24"	29°51'23,18"		1,8	Невская Губа. Сброс нефте-содержащих вод с неподвижно-стоящего судна
		59°56'6,86"	29°47'33,93"		0,7	Невская Губа. Слик, обусловленный береговыми стоками вблизи г. Ломоносов
2011.06.19	08:56	59°15'1,42"	22° 9'2,40"		15	Большой сброс
		59°30'56,69"	23° 0'19,85"		20,6	Сброс-«гребенка»
2011.06.22	08:45	60° 8'40,60"	29°13'9,59"		4,9	Слик, обусловленный береговыми стоками
2011.06.25	19:58	59° 8'47,18"	21°36'11,72"	78	6,24	Прямой тонкий сброс
2011.07.09	19:48	59°57'54,29"	25°51'58,55"	2,76	0,2208	Округлый слик

Дата	Время (UTC)	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Длина (км)	Площадь (кв. км)	Комментарий
2011.08.16	08:29	59°56'34,50"	30° 4'41,47"		3,3	Два слика вблизи устья Невы
		59°55'24,16"	30°10'35,05"		2,8	
2011.08.21	20:11	59°27'21,87"	22° 5'13,68"	16,8	1,2	Слабо-контрастный прерывистый слик
2011.08.24	08:37	59°54'13,31"	30° 9'4,55"		3,5	Невская Губа. Слик вблизи береговой черты
2011.10.09	08:50	59°59'19,77"	26°40'22,84"		28,5	Крупнейший сброс за период наблюдений 2009–2012 гг.
		59°58'51,37"	26°48'35,44"		1,1	
2011.11.03	08:33	59°55'33,50"	29°48'22,25"		13,1	Невская Губа. Слик, обусловленный береговыми стоками вблизи г. Ломоносов
2011.11.03	19:59	59°31'1,68"	22°33'26,27"	41,7	4,20	Тонкий прерывистый слик

Успешное обнаружение нефтяных загрязнений средствами спутниковой радиолокации в определённой степени обусловлено погодными условиями [Brekke, Solberg, 2005; Espedal, Johannessen, 2000]. Этим объясняется тот факт, что все загрязнения, выявленные по радиолокационным данным, приходятся на период с апреля по ноябрь, когда скорость ветра и волнение преимущественно умеренные или слабые. В ноябре и декабре нередко наблюдаются ветра со скоростью более 12 м/с и шторма — условия, при которых плёнки нефтяных загрязнений быстро разрушаются, и заметного выглаживания морской поверхности не происходит. В период с января по март почти вся площадь Финского залива покрывается льдом.

3.3. ПРОГНОЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОЦЕНКА РИСКОВ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

3.3.1. Модель Seatrack Web SMNI

Важную роль играет не только спутниковый мониторинг различных акваторий, судоходных трасс, портов, нефтяных терминалов и платформ, а также других объектов морской нефтегазовой отрасли в Балтийском море, но и оценка потенциально возможных рисков нефтяного загрязнения морской окружающей среды [Kostianou et al., 2014b]. Оригинальная методика оценки таких рисков, основанная на использовании численной модели Seatrack Web дрейфа и трансформации нефтяных пятен Шведского метеорологического и гидрологического института (SMNI), была разработана нами в 2004 г. во время комплексного спутникового мониторинга Юго-Восточной Балтики в связи с началом добычи нефти на платформе D-6 [Костяной, Булычева, 2014; Костяной и др., 2012; Лаврова и др., 2011а; Kostianou et al., 2005, 2006, 2014b]. Затем она была развита для оценки рисков нефтяного загрязнения морской окружа-

ющей среды, охраняемых зон и берегов в результате судоходства по основным трассам в Балтике [Kostianoy et al., 2014b].

Модель Seatrack Web — это уникальная европейская модель, позволяющая рассчитывать на всей акватории Балтики дрейф и трансформацию пятен различных типов нефтепродуктов на пять суток вперёд с пространственным разрешением одна морская миля и временным разрешением 15 мин, с учётом обновляющегося прогноза поля ветра (и ряда других метеорологических параметров) и течений каждые три часа. Она основана на европейских оперативных атмосферных моделях ECMWF и HIRLAM и гидродинамической модели HIROMB, кроме того, она включает модель трансформации и дрейфа пятен нефтепродуктов различного типа, объёма и содержания. Кроме положения пятна, рассчитывается его состояние на каждые 15 мин — координаты центра, скорость и направление дрейфа, объём смеси с водой, процент испарившейся, диспергированной, осевшей на дно и достигшей побережья нефти, воды в смеси. Она также позволяет восстанавливать историю дрейфа пятен до 30 сут назад.

Именно эта модель используется HELCOM для оперативного прогноза дрейфа нефтяных загрязнений на акватории Балтики и установления виновников загрязнений, благодаря встроенной оперативной системе автоматической идентификации судов (Automatic Identification System, AIS). Эта модель сегодня активно используется в Швеции, Дании, Финляндии, Польше, Эстонии, Латвии, Литве и России [Булычева, Костяной, 2011; Костяной, Булычева, 2014; Ambjörn, 2004, 2006; Kostianoy et al., 2008, 2014b]. Кроме того, модель позволила делать оценки рисков загрязнения нефтепродуктами различных акваторий и береговой зоны от разных источников [Kostianoy et al., 2008, 2014b]. Следует отметить, что в Балтийском море существует более 60 морских охраняемых зон, которые требуют не только спутникового мониторинга нефтяного загрязнения, но и оценки рисков загрязнения.

Модель разрабатывается и модифицируется с 1995 г. Федеральным морским и гидрологическим агентством (Гамбург, Германия, Federal Maritime and Hydrological Agency (BSH)) и Шведским институтом метеорологии и гидрологии (Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)). В 1998 г. к работе над моделью присоединилась Датская королевская администрация по навигации и гидрографии (Royal Danish Administration of Navigation and Hydrography (RDANH)), в 2003 г. — Финский институт окружающей среды (Finnish Environment Institute (SYKE)). В работе над моделью принимают участие ещё шесть институтов в Швеции, Германии, Финляндии и Польше.

Расчёт ведётся на суперкомпьютерах SGI Origin 3800 (33 процессора) и CRAY T3E-600 (216 процессоров, одна из последних версий CRAY). Пространственное разрешение модели составляет одна морская миля, при этом численная сетка имеет 1 121 746 активных точек, из которых 144 449 — на поверхности моря. Модель имеет 24 слоя толщиной от 4 м у поверхности до 60 м у дна. Шаг по времени составляет 15 мин.

Модель сопряжена с оперативной атмосферной моделью HIRLAM (разрешение 22 км), которая даёт: атмосферное давление, скорость и направление ветра, влажность и температуру воздуха у водной поверхности, облачность четыре раза в день. Ветровое волнение задаётся моделью NYPAS. Кроме того, используется приливная модель, и задаётся уровень моря на входе в Балтийское море из Северного моря. Пресноводный сток даётся по 82 рекам.

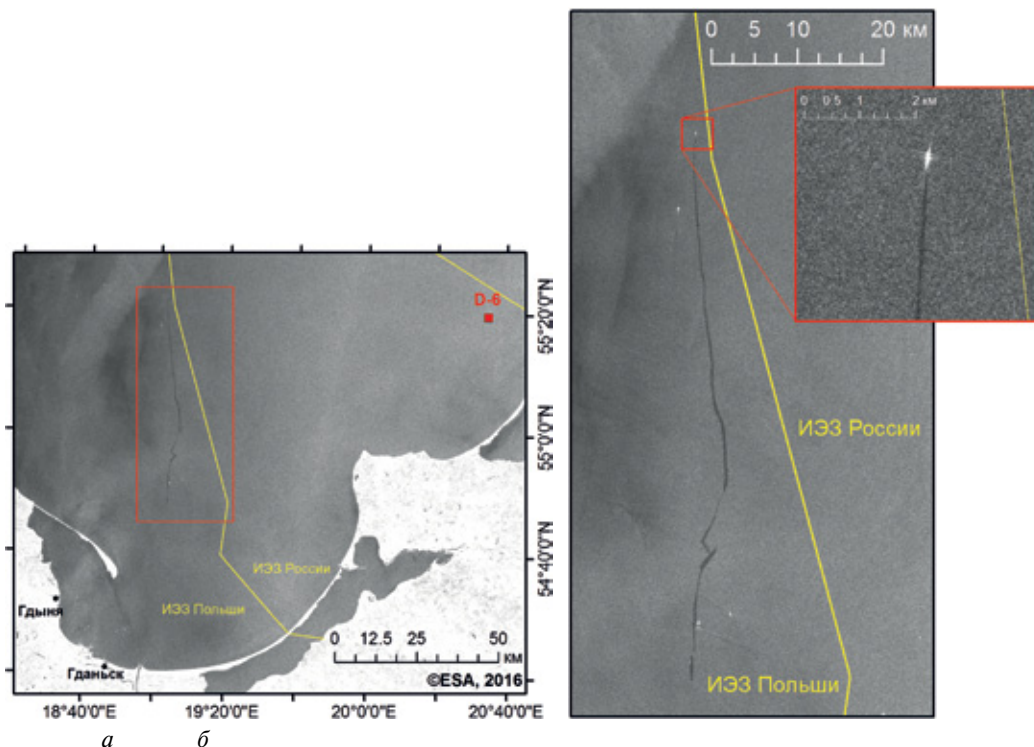
3.3.2. Юго-Восточная Балтика

На основе интерактивной численной модели Seatrack Web выполнялся прогноз дрейфа: 1) всех крупных нефтяных пятен, обнаруженных с 2004 по 2016 г. на радиолокационных снимках со спутников Envisat, Radarsat-1, Radarsat-2 и COSMO-SkyMed-1, -2, -3, -4, TerraSAR-X, Sentinel-1A и Sentinel-1B в Юго-Восточной Балтике, полученных в рамках экологического мониторинга нефтяного месторождения «Кравцовское» (D-6); 2) потенциальных модельных пятен с платформы D-6; 3) потенциальных модельных пятен с подводного трубопровода, соединяющего платформу D-6 с береговыми сооружениями; 4) потенциальных модельных пятен с главной судоходной трассы, ведущей к входу в Калининградский канал; 5) потенциальных модельных пятен к западу от Самбийского полуострова [Булычева, Костяной, 2011; Костяной, Булычева, 2014; Костяной и др., 2012; Лаврова и др., 2011a; Bulycheva et al., 2014; Kostianou et al., 2005, 2006, 2014b]. Приведём несколько примеров.

В результате многолетнего спутникового мониторинга Юго-Восточной Балтики было установлено, что основными источниками нефтяного загрязнения, наблюдаемого на РЛИ, являются суда различных типов. Для идентификации судна-загрязнителя мы используем автоматическую систему идентификации судов (AIS) и модель Seatrack Web, которая также сопряжена с AIS. Получение РЛИ через несколько часов после нефтяного сброса осложняет идентификацию судна-загрязнителя, поскольку судно на РЛИ уже не видно и трудно установить прямую связь между судном и загрязнением. Однако существует положительный опыт идентификации нарушителя с помощью AIS, в случаях, когда спутниковый снимок был сделан непосредственно в момент нелегального сброса [Булычева, Костяной, 2014; Костяной, Булычева, 2014].

Приведём свежий пример. 23 июля 2016 г. (04:59 GMT) в Юго-Восточной Балтике со спутника Sentinel-1A был зафиксирован нелегальный сброс с судна вод, содержащих нефтепродукты (рис. 3.15). Радиолокационная съёмка проводилась непосредственно в момент сброса нефтесодержащих вод, что позволило идентифицировать источник загрязнения с помощью AIS. Координаты судна на момент получения снимка со спутника $55^{\circ}22'26''$ с.ш., $19^{\circ}02'00''$ в.д. (белая точка на рис. 3.15б). Пятно протяжённостью $64,97$ км занимало площадь $16,9$ км², что примерно оценивается в 17 т нефтесодержащих вод. Это одно из самых протяжённых пятен, которое было зафиксировано за 13 лет спутникового мониторинга этого района [Костяной и др., 2016].

Для прогноза дрейфа нефтяного загрязнения была использована интерактивная оперативная численная модель Seatrack Web (SMNI, HELCOM). Благодаря внедрённой в модель системе AIS удалось достоверно установить, что источником нефтяного загрязнения являлся химвоз «Амарант», шедший под флагом Вануату (oil/chemical tanker “Amaranth” («Амарант»), IMO: 7816484, MMSI: 576321000), который вышел из Гдыни (Польша) 22.07.2016 г. в 22:00 GMT. Судно имеет размер в длину 118 м и ширину 16 м, валовый тоннаж составляет 4382 т, дедвейт — 5858 т. В 00:30 GMT 23.07.2016 г. судно вышло за пределы территориальных вод Польши, снизило скорость до 8 узлов, после чего начался нелегальный сброс загрязнённых вод (вероятно промыв танков), который продолжался более $4,5$ ч и был зафиксирован на РЛИ в 04:59 GMT (см. рис. 3.15). Подробный маршрут судна «Амарант» с момента выхода из порта до момента пролёта спутника представлен на рис. 3.16а благодаря данным AIS [Костяной и др., 2016].



Р и с. 3.15. Фрагмент РЛИ со спутника Sentinel-1A от 23.07.2016 г. (04:59 GMT), на котором был зафиксирован нелегальный нефтяной сброс с движущегося судна: *а* — общий план; *б* — увеличенное изображение нефтяного пятна [Костяной и др., 2016]

Вероятно, после окончания сброса судно направилось обратно в порт Гдыня, при этом в 09:00 GMT судно вновь повернуло и шло 28 км на север до 11:00 GMT, затем вновь повернуло в Гдыню. Детали маршрута судна «Амарант» после момента пролёта спутника представлены на рис. 3.16б. Не исключена вероятность повторного нелегального нефтяного сброса на последующих прямолинейных галсах, которые совершало судно.

Не вызывает сомнений, что судно специально выходило для очистки танков в открытом море. Сброс загрязнённых вод происходил за пределами территориальных вод Польши, но в её Исключительной экономической зоне (ИЭЗ) и в непосредственной близости от ИЭЗ России (см. рис. 3.16).

Численное моделирование дрейфа и трансформации нефтяного разлива за судном показало следующую деформацию и смещение обнаруженного прямолинейного пятна в течение 48 ч, показанную на рис. 3.17. Незначительное смещение пятна на запад и восток относительно начального положения объясняется слабым ветром и течениями, которые наблюдались в последующие двое суток (рис. 3.18)

Система AIS, сопряжённая с моделью Seatrack Web, показала наличие двух судов в непосредственной близости от северной оконечности нефтяного пятна (рис. 3.19) и нескольких других судов вокруг самого нефтяного пятна (рис. 3.20).

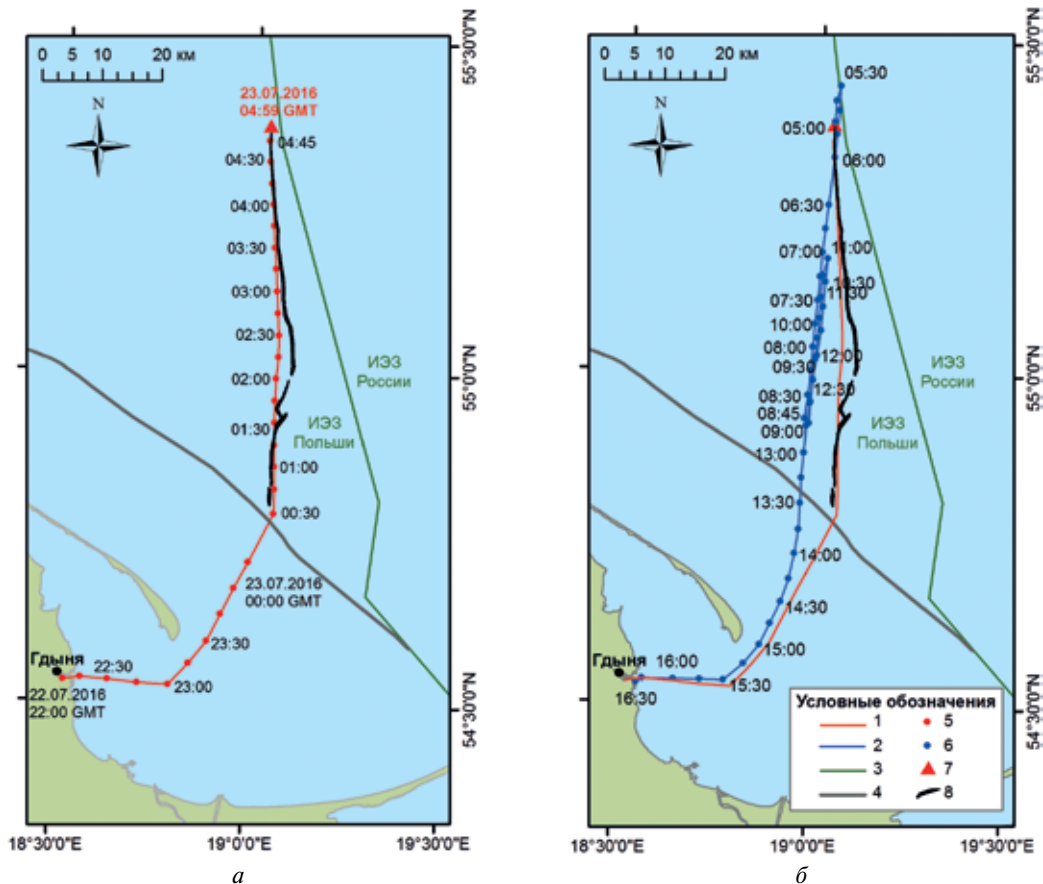
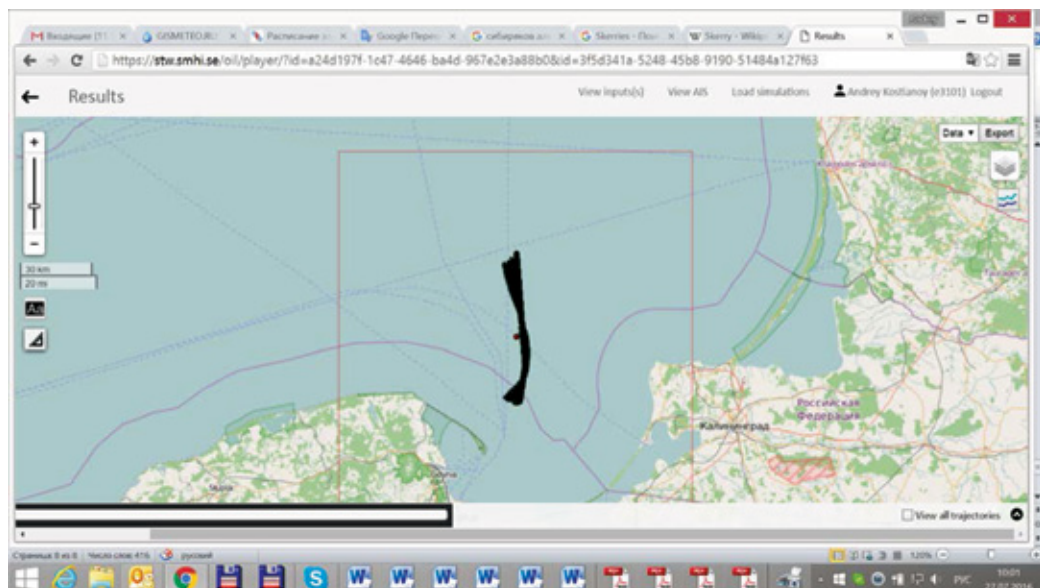
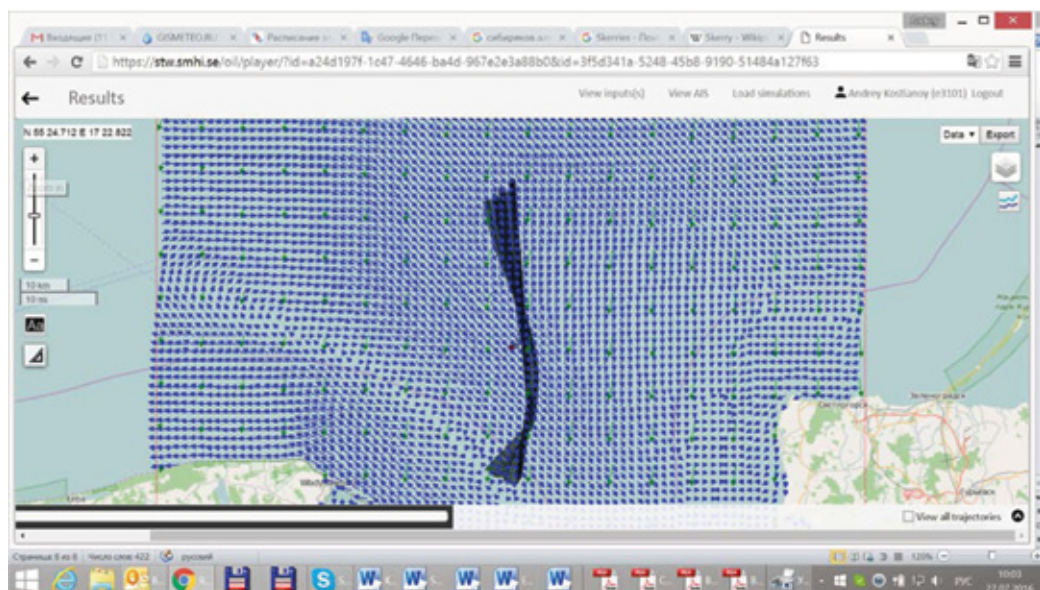


Рис. 3.16. Траектория движения судна «Амарант»: *а* — до момента получения спутникового изображения с 22:00 GMT 22.07.2016 г. до 04:45 GMT 23.07.2016 г.; *б* — после получения РЛИ с 05:00 GMT 23.07.2016 г. до 16:30 GMT 23.07.2016 г. Условные обозначения: 1 — траектория движения судна из порта Гдыня до момента получения снимка; 2 — траектория движения судна после нелегального сброса с 05:00 GMT до 16:30 GMT 23.07.2016 г.; 3 — Исключительные экономические зоны России и Польши; 4 — граница территориальных вод Польши; 5 — положение судна с временным интервалом 15 мин по данным АИС до получения РЛИ; 6 — положение судна с временным интервалом 15 мин по данным АИС после получения РЛИ; 7 — положение судна «Амарант» на момент пролёта спутника; 8 — положение нефтяного пятна на РЛИ [Костяной и др., 2016]

Из нескольких судов только химовоз «Амарант» (по данным АИС и на РЛИ) находился точно у северной оконечности пятна, а его координаты точно совпадали по данным АИС и на РЛИ, кроме того, практически совпала траектория его движения и координаты нефтяного пятна (см. рис. 3.16 и 3.21). Интересно отметить, что примерно в 02:30 GMT 23 июля 2016 г. судно «Амарант» находилось на одной широте и в 10 км западнее от НИС «Профессор Штокман» Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, который возвращался из научного рейса в Калининград (см. рис. 3.21).



Р и с. 3.17. Смещение и деформация нефтяного пятна, обнаруженного на РЛИ 23.07.2016 г. (04:59 GMT), в течение 48 ч по данным численного моделирования (Seatrack Web)



Р и с. 3.18. Смещение и деформация нефтяного пятна, обнаруженного на РЛИ 23.07.2016 г. (04:59 GMT), в течение 48 ч по данным численного моделирования (Seatrack Web). Синими стрелками показано поле течений, зелёными — поле ветра

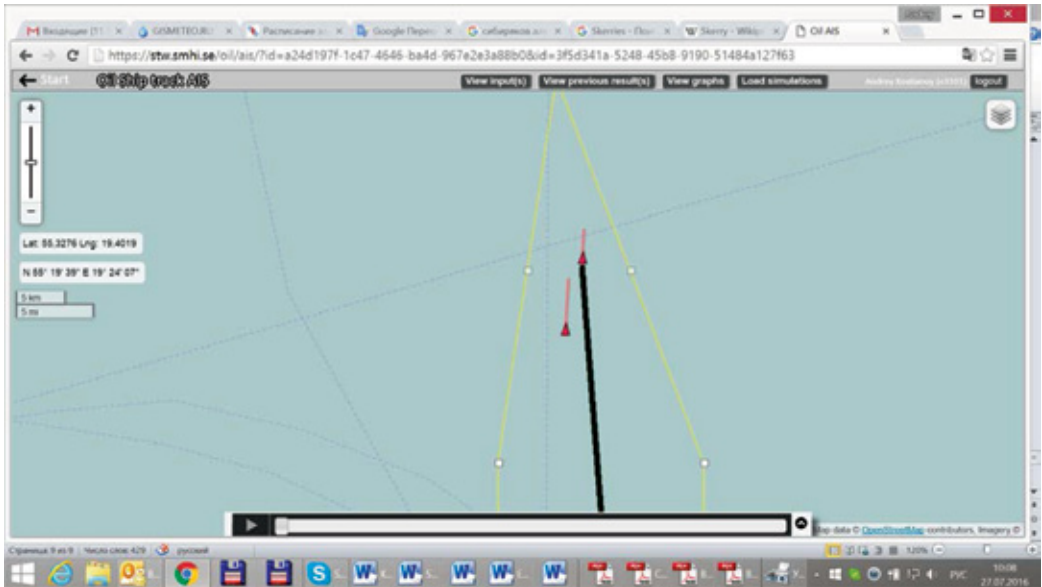


Рис. 3.19. Положение двух судов (красные стрелки) в непосредственной близости от северной оконечности пятна по данным AIS, внедрённой в модель Seatrack Web

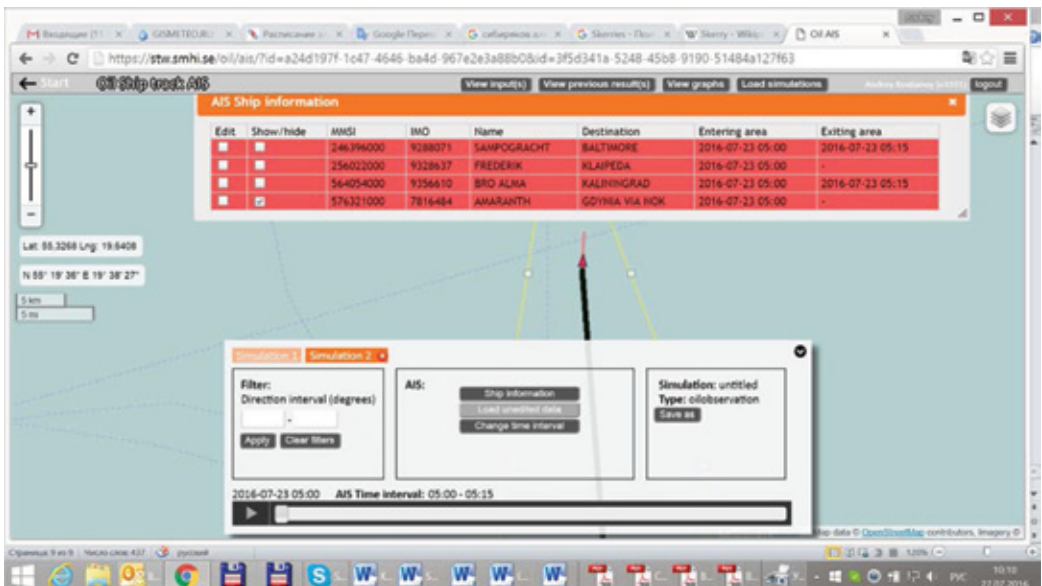
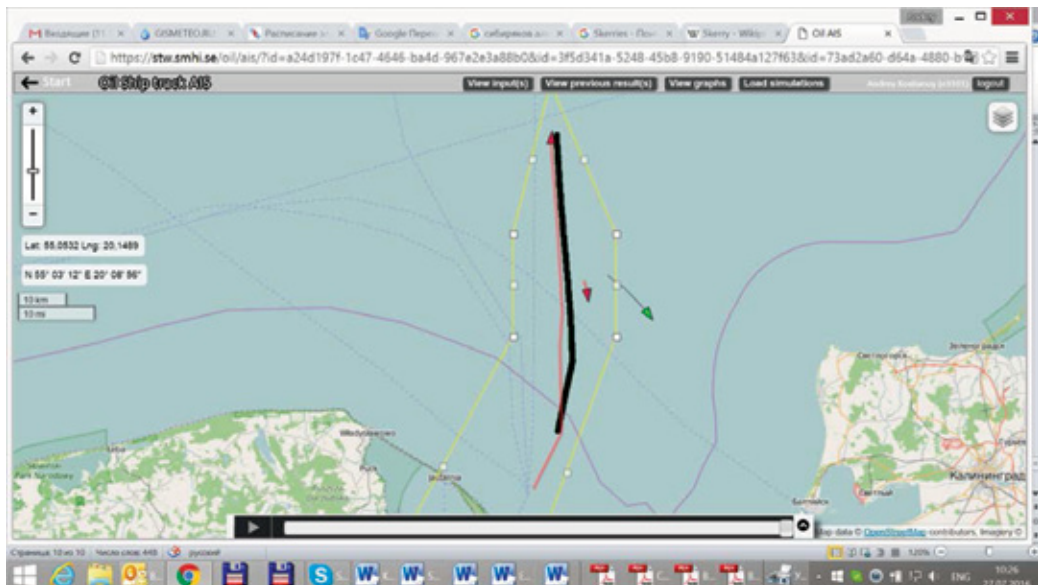


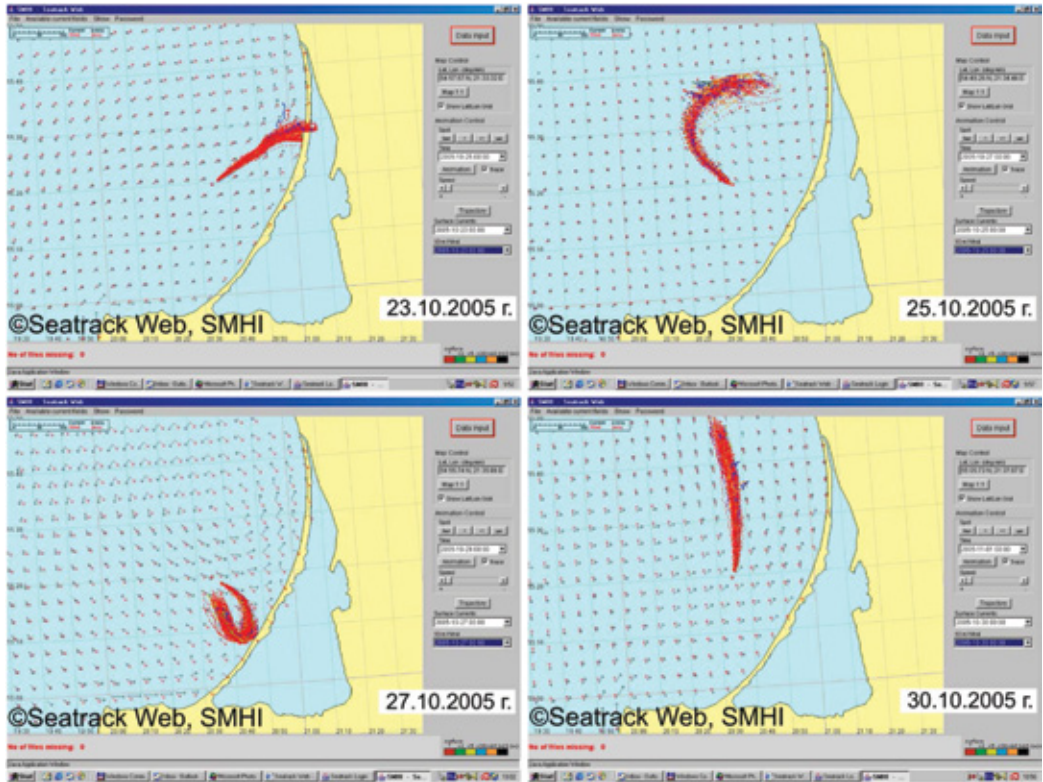
Рис. 3.20. Информация о четырёх судах, находящихся вблизи обнаруженного нефтяного пятна по данным AIS, внедрённой в модель Seatrack Web



Р и с. 3.21. Траектория движения судна-виновника слива (красная линия) и НИС «Профессор Штокман» (зелёная линия) за период с 00:00 по 05:00 GMT 23 июля 2016 г.

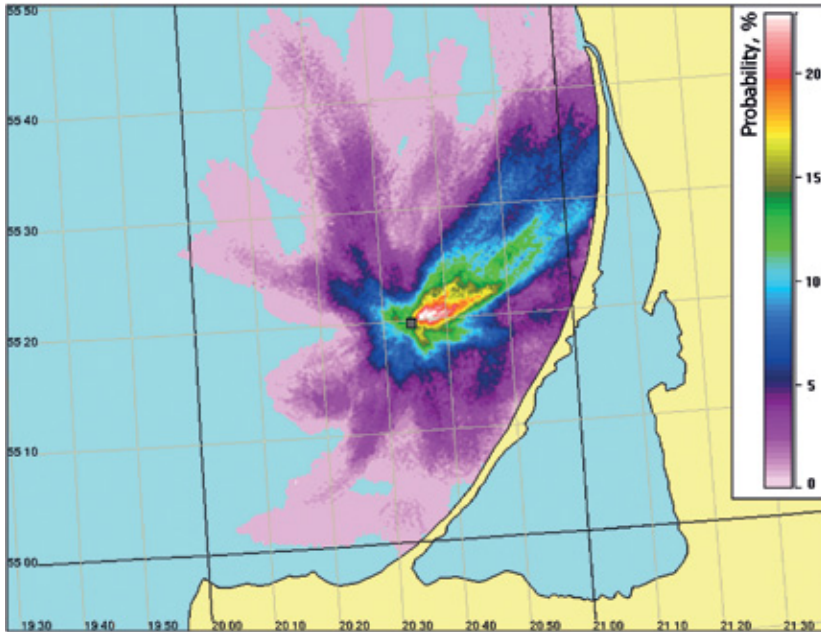
Информация об этом нелегальном сбросе нефтесодержащих вод вместе с изображением пятна на РЛИ, результатами моделирования и информацией о судне была направлена в рабочую группу HELCOM для рассмотрения и принятия последующих мер. Следует отметить, что в HELCOM не были осведомлены об этом инциденте, несмотря на существующую практику Европейского агентства по морской безопасности (EMSA) по обеспечению балтийских стран и HELCOM оперативной спутниковой информацией о нефтяном загрязнении Балтийского моря. Исследованный случай нефтяного загрязнения морской поверхности показал высокую эффективность совместного анализа РЛИ, вспомогательной спутниковой и метеорологической информации, использования численной модели Seatrack Web и системы автоматической идентификации судов AIS.

В 2004 г. на основе модели Seatrack Web нами была разработана методика определения рисков нефтяного загрязнения морской окружающей среды с нефтедобывающей платформы D-6 [Костяной, Булычева, 2014; Костяной и др., 2012; Лаврова и др., 2011a; Kostianou et al., 2005, 2006, 2014b]. В 2004–2005 гг. ежедневно выполнялся численный прогноз на 48 часов распространения нефтяного пятна (траектория движения) в случае аварийного разлива нефти объёмом 10 м^3 на платформе D-6. На рис. 3.22 представлено несколько результатов численного моделирования дрейфа пятен в октябре 2005 г. Сильная изменчивость скорости и направления дрейфа пятен связана с большой изменчивостью как поля ветра, так и результирующих течений в этой мелководной части моря. Это лишний раз подтверждает необходимость использования оперативных гидрометеорологических данных в численном моделировании, как это делается в модели Seatrack Web, а не среднеклиматических характеристик гидрометеорологических условий, как это обычно делается при оценках воздействия на окружающую среду (ОВОС).

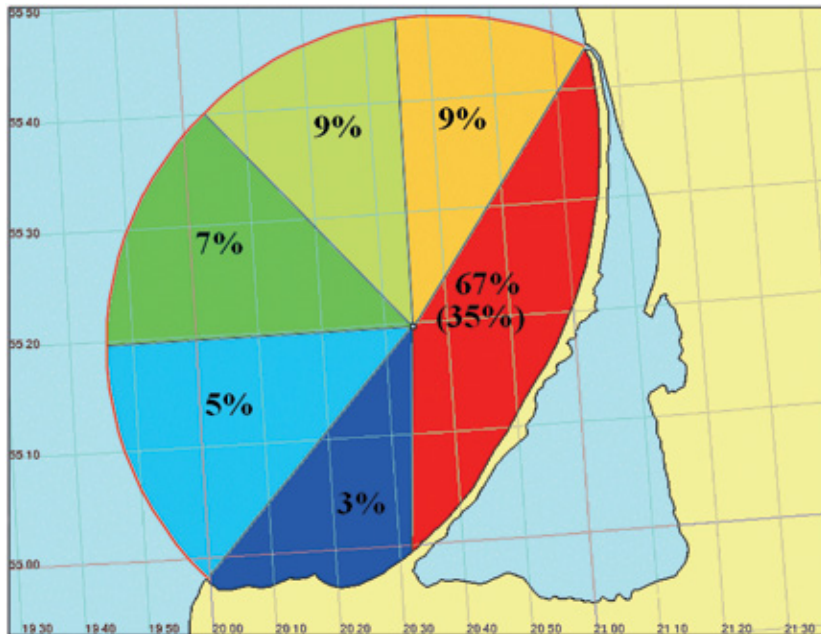


Р и с. 3.22. Прогноз дрейфа виртуального нефтяного пятна с платформы D-6 23, 25, 27 и 30 октября 2005 г.

Статистика ежедневных прогнозов дрейфа нефтяных пятен с платформы D-6 за июль-декабрь 2004 г., полученная в результате наложения около 180 ежедневных дрейфов пятен друг на друга и последующего нормирования на количество численных экспериментов, показывает ареал распространения и потенциальную вероятность (%) нахождения пятна в любой точке акватории (рис. 3.23) или направления его дрейфа (рис. 3.24) в течение 48 ч после аварийного разлива нефти объёмом 10 м^3 . В соответствии с преобладающим направлением ветра и вдольбереговым течением, максимальная вероятность риска нефтяного загрязнения направлена на северо-восток (см. рис. 3.23). При этом данная вероятностная карта позволяет количественно определить риск нефтяного загрязнения не только любой точки акватории, но и береговой линии Куршской косы. Следует отметить, что риску нефтяного загрязнения подвержены акватория (причём во всех направлениях от платформы D-6) и береговая линия РФ и Литвы. На сектор (150°), направленный на Куршскую косу, приходится 67 % вероятных дрейфов пятен, причём, только в половине этих случаев (35 %) пятна достигали бы береговой линии, что объясняется интенсивным вдольбереговым течением, которое препятствует посадке нефтяного пятна на берег (рис. 3.24).



Р и с. 3.23. Вероятность распространения (%) в течение 48 ч потенциального нефтяного загрязнения с платформы D-6 с июля по декабрь 2004 г.



Р и с. 3.24. Вероятность распространения в течение 48 ч потенциального нефтяного загрязнения с платформы D-6 в соответствующих секторах с июля по декабрь 2004 г.

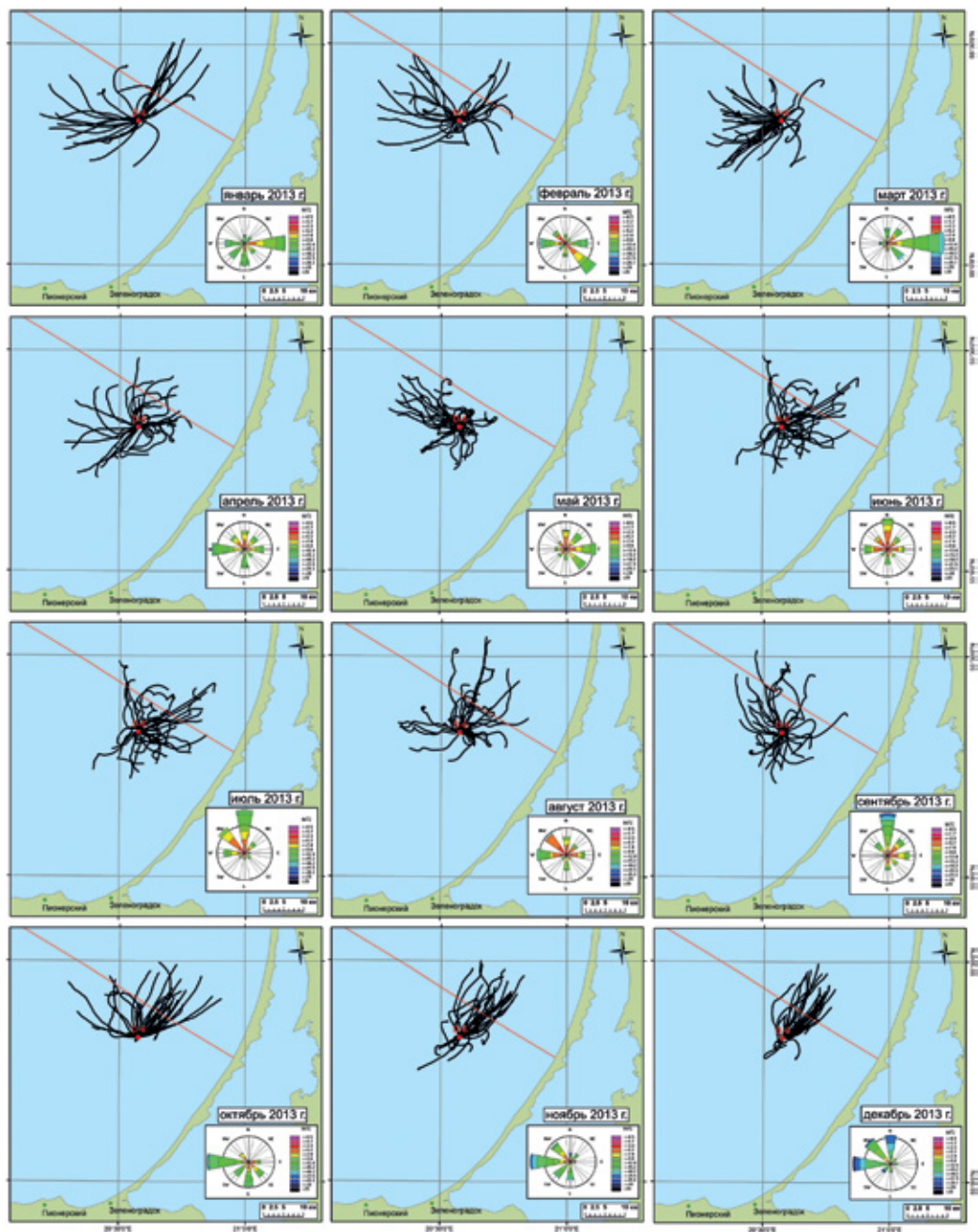
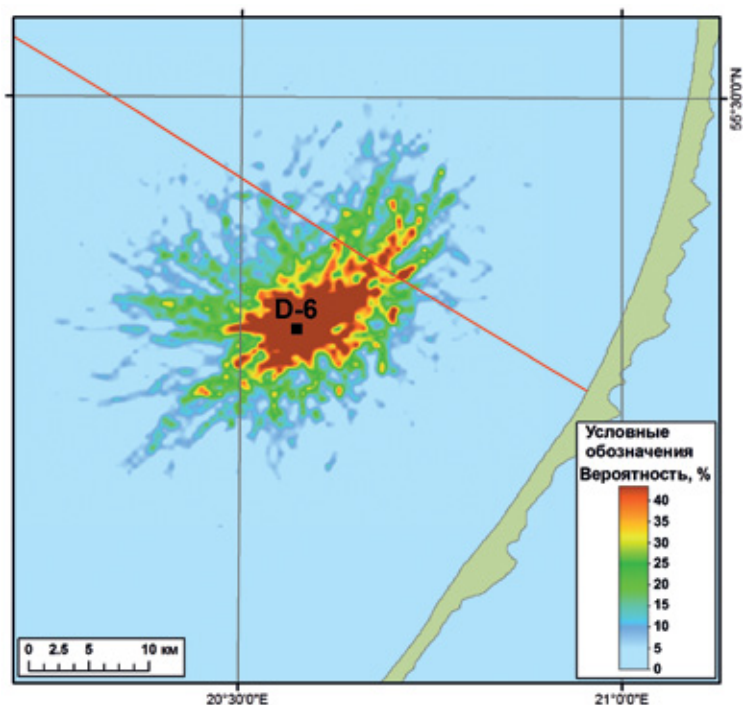


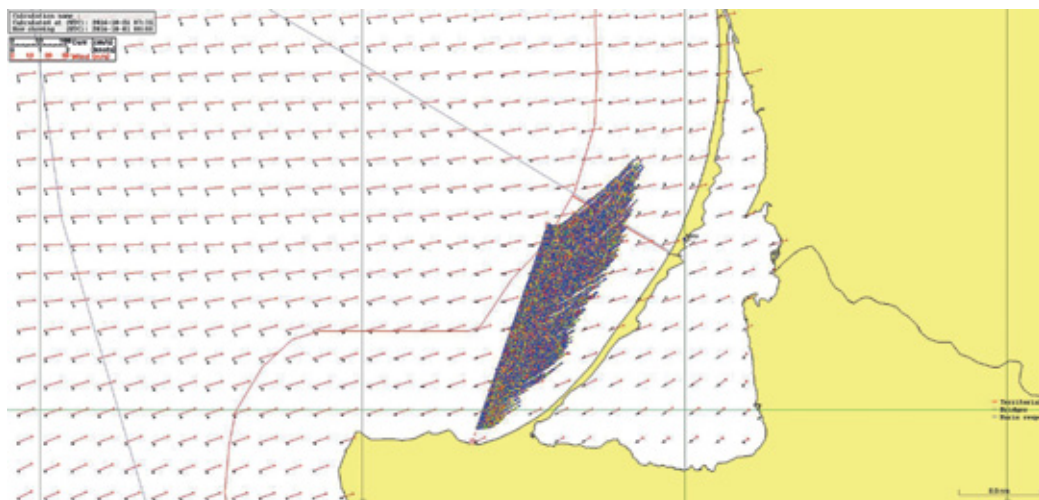
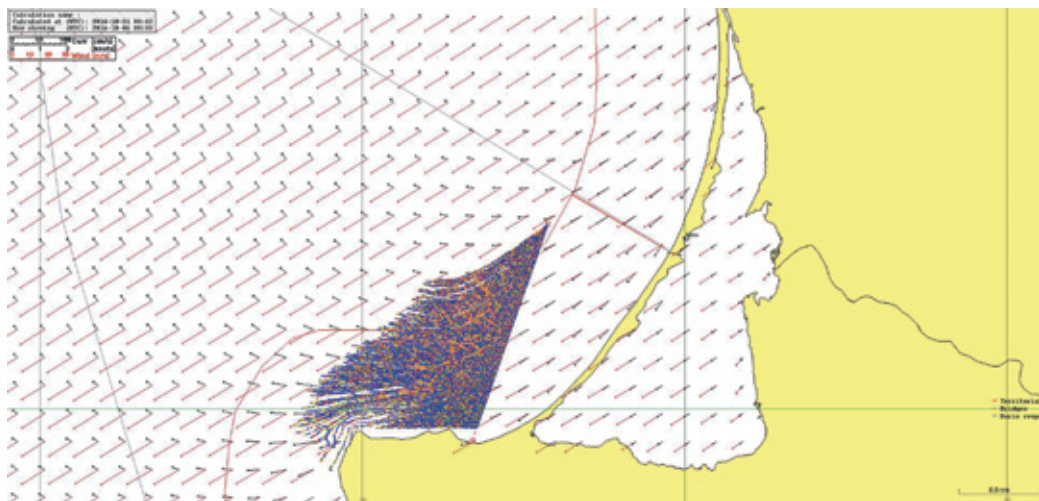
Рис. 3.25. Ежемесячные кумулятивные траектории распространения потенциального нефтяного пятна, образовавшегося от МЛСП D-6 по данным Seatrack Web для 2013 г. [Костяной, Булычева, 2014]

Разработанная методика позволяет ежедневно планировать и корректировать план работ по ликвидации потенциально возможной аварии (утечка нефти) на платформе D-6 или на подводном нефтепроводе, идущим от платформы к берегу, что в случае реальной чрезвычайной ситуации даст ощутимый эффект в скорости и правильности принимаемых решений по ликвидации последствий аварии и защите побережья Куршской косы или Самбийского полуострова.

С 1 января 2013 г. по 31 декабря 2014 г. выполнялись ежедневные численные прогнозы потенциального выброса нефти с морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) D-6. Траектории дрейфа модельных пятен (траектории движения центра пятен) по месяцам 2013 г. и розы ветров представлены на рис. 3.25 [Костяной, Булычева, 2014]. Результаты модельного прогноза показали, что при преобладающем ветре западных румбов (например, в октябре и ноябре 2013 г.), нефтяное пятно, исходящее от платформы при наблюдаемых метеорологических условиях, не будет двигаться в сторону побережья Куршской косы, а будет увлекаться вдольбереговыми течениями на северо-восток. Модельный прогноз показал (см. рис. 3.25), что при потенциальной аварии на платформе в 2013 г. нефтяное пятно ни разу не достигло бы побережья Куршской косы в течение первых 48 ч после аварии. Потенциальная вероятность (%) нахождения пятна в любой точке акватории или направления его дрейфа в течение 48 ч после аварийного разлива нефти для 2013 г. показана на рис. 3.26.



Р и с. 3.26. Вероятность распространения (%) в течение 48 ч потенциального нефтяного загрязнения с платформы D-6 с января по декабрь 2013 г. [Костяной, Булычева, 2014]

*a**б*

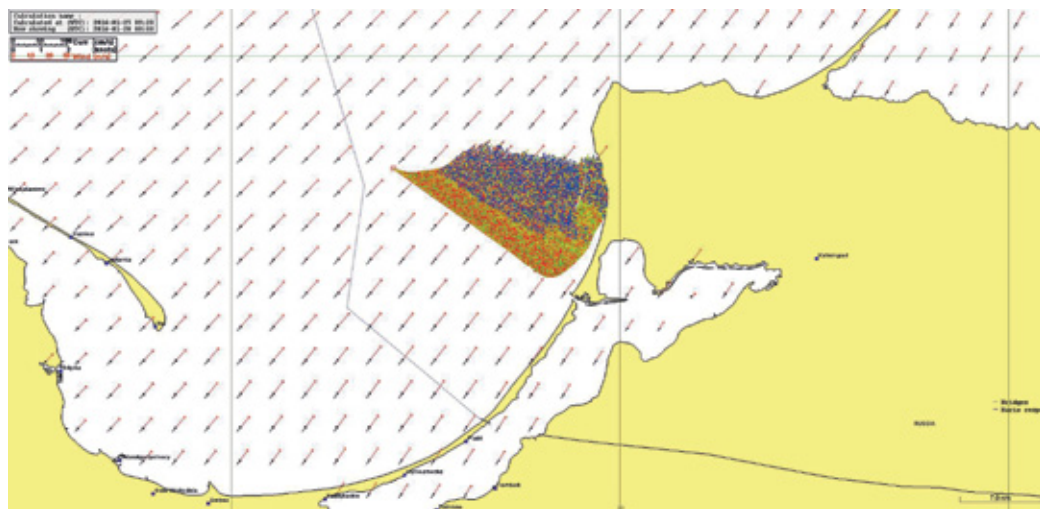
Р и с. 3.27. Результаты численного моделирования дрейфа и трансформации нефтяного пятна в случае аварии на подводном нефтепроводе, соединяющем платформу D-6 с береговыми сооружениями: *a* — с 29 сентября по 1 октября 2016 г.; *б* — с 4 по 6 октября 2016 г. Поле ветра показано красными стрелками, а поле течений — чёрными

Сравнение рис. 3.23 (карта рисков загрязнения за 2004 г.) и рис. 3.26 (карта рисков загрязнения за 2013 г.) показало, что за 10 лет произошло существенное изменение регионального климата, которое проявилось в изменении скорости и направления преобладающих ветров, и, как следствие, привело к существенному изменению поля вероятности нефтяного загрязнения. Если в 2004 г. существовал реальный риск (хоть и в разной степени) нефтяного загрязнения Куршской косы в течение 48 ч по-

сле виртуальной аварии на платформе D-6, то в 2013 г. такой риск полностью исчез. Этот факт подтверждает необходимость проведения ежегодного (ежедневного) моделирования рисков нефтяного загрязнения с платформы D-6, поскольку гидрометеорологические условия в Юго-Восточной Балтике меняются существенно.

В 2016 г. аналогичную работу было решено проводить и для моделирования потенциально возможной утечки нефти из подводного нефтепровода, соединяющего нефтяную платформу D-6 с береговыми сооружениями «ЛУКОЙЛ-Калининград-морнефть» на Самбийском полуострове. На рис. 3.27 представлено два результата численного моделирования такой утечки, которая считается равновероятной вдоль подводного трубопровода. В первом случае, с 29 сентября по 1 октября 2016 г. нефтяное пятно распространялось бы на северо-восток в соответствии с генеральным направлением ветра и течений в этом районе (см. рис. 3.27а). Во втором случае, с 4 по 6 октября 2016 г. нефтяное пятно распространялось бы на юго-запад в соответствии с наблюдаемым полем ветра и течений (см. рис. 3.27б). Здесь следует отметить, что ветер и течения очень быстро меняют своё направление, кроме того, участились случаи продолжительного воздействия северо-восточного ветра, как на рис. 3.27б, что следует учитывать при осуществлении производственно-экологического мониторинга объектов обустройства Кравцовского нефтяного месторождения.

В 2013–2016 гг. также были сделаны ежедневные прогнозы дрейфа потенциального нефтяного загрязнения от главной судоходной трассы в Гданьском заливе, ведущей ко входу в Калининградский канал [Костяной, Булычева, 2014]. Численное моделирование неоднократно показывало случаи потенциального нефтяного загрязнения западного побережья Самбийского п-ова от г. Балтийск до пос. Янтарный (на пример, рис. 3.28).



Р и с. 3.28. Прогноз дрейфа потенциального загрязнения на судоходной трассе западнее Самбийского п-ова для метеорологической ситуации с 18 (00:00 UTC) по 20 января (00:00 UTC) 2016 г.

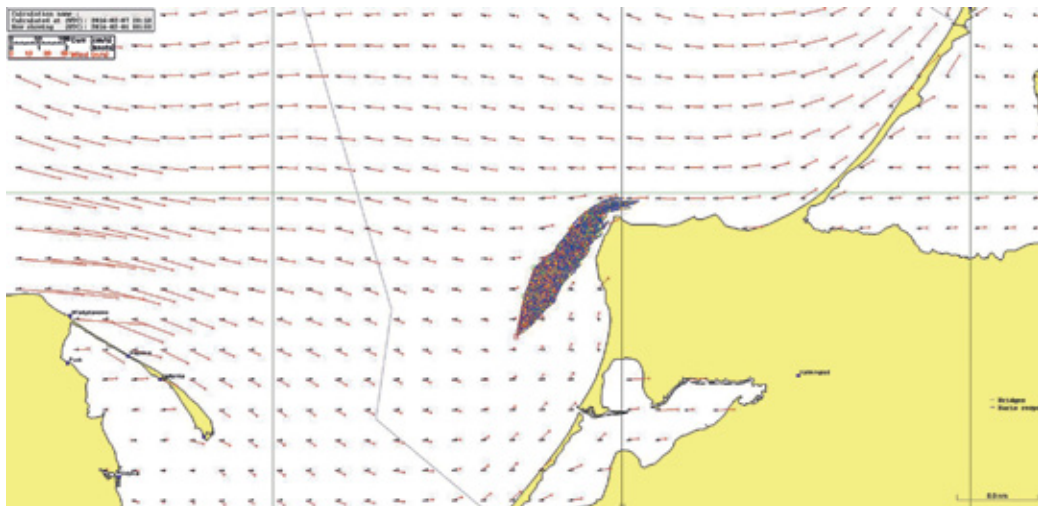


Рис. 3.29. Прогноз дрейфа потенциального загрязнения от источника западнее Самбийского п-ова для метеорологической ситуации со 2-го (00:00 UTC) по 4 февраля (00:00 UTC) 2016 г.

В Юго-Восточной Балтике наиболее загрязнённой нефтепродуктами акваторией является район к западу от Самбийского п-ова [Бульчева, 2012; Бульчева, Костяной, 2011, 2014; Бульчева и др., 2016а, б; Костяной и др., 2012; Bulychева et al., 2014, 2015, 2016; Kostianou, Lavrova, 2014; Kostianou et al., 2005, 2006, 2014b]. Известен случай (2008), когда нефтяное загрязнение морской поверхности в указанном районе явилось результатом нефтяного загрязнения пляжей северного побережья Самбийского п-ова, а так же пляжей Куршской косы от пос. Лесной до пос. Морское. Причём, выброс нефти на пляжи наблюдался в течение более чем месяца после обнаруженного на РЛИ нефтяного пятна [Бульчева, Костяной, 2011, 2014]. Поэтому этот район также был выбран для численного моделирования.

За период 2013–2016 гг. было отмечено несколько похожих ситуаций, когда модельное пятно от района западнее Самбийского п-ова достигало побережья Куршской косы [Бульчева, Костяной, 2011, 2014]. На рис. 3.29 представлены результаты моделирования нефтяного загрязнения исследуемого района со 2 по 4 февраля 2016 г.

3.3.3. Финский залив

Как было показано в предыдущем разделе (3.2), часть нефтяного загрязнения в Финском заливе сконцентрирована вдоль основной судоходной трассы, идущей от входа в залив до порта Санкт-Петербург. В связи с этим в отдельные месяцы 2014 г. и ежедневно в 2016 г. проводилось численное моделирование дрейфа и трансформации нефтяных пятен, которые могли равновероятно появиться в любой точке судоходной трассы.

Например, с 19 сентября по 18 ноября 2014 г. проводилось численное моделирование (модель Seatrack Web) ежедневного дрейфа потенциально возможного нефтяного загрязнения вдоль судоходной трассы в Финском заливе для исследования

влияния гидрометеорологических, динамических и циркуляционных процессов на перенос загрязнений [Костяной, Булычева, 2014]. Общая длина выбранного участка судоходной трассы от дамбы комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) до выхода из Финского залива примерно на $22^{\circ}30'$ в.д. — 400 км (рис. 3.30). Вдоль трассы модельным образом ежедневно в 00:00 UTC равномерно выливалось 40 м^3 смазочного масла. Моделирование дрейфа нефтяного пятна проводилось на 48 ч вперёд с момента сброса нефтепродукта на поверхность моря, при этом каждые три часа моделью задавались необходимые прогнозные гидрометеорологические параметры, такие как скорость и направление ветра, скорость направление течений и др. Основные гидрометеорологические параметры также отображались на картах (всего 61 карта) дрейфа нефтяных пятен для наглядности. Синими стрелками указано поле течений, зелёными — поле ветра, а чёрными линиями — дрейф нефтяных пятен от судоходной трассы. Красными линиями отмечался дрейф нефтяных пятен в тех случаях, когда в течение 48 ч после разлива нефтепродуктов, нефтяное пятно садилось на берег островов или суши. Пространственное разрешение отдельных линий дрейфа вдоль трассы — около 1 км. На рис. 3.31, 3.32, 3.33 представлены примеры результатов моделирования в виде карт с указанием необходимой информации.

На рис. 3.31 представлена характерная ситуация с дрейфом нефтяного загрязнения от судоходной трассы на север, что наблюдается в большинстве случаев, поскольку преобладающий ветер в Финском заливе направлен на северо-восток. При достаточно сильном южном ветре (15 м/с), который устойчиво дул 24 и 25 октября 2014 г., дрейф нефтяного загрязнения на отдельных участках трассы достигал 30–45 км за 48 ч. Таким образом, к концу вторых суток нефтяному загрязнению подверглись берега многочисленных островов к западу от Хельсинки, о. Гогланд и северный берег РФ в крайней восточной части Финского залива (красные линии) [Костяной, Булычева, 2014].

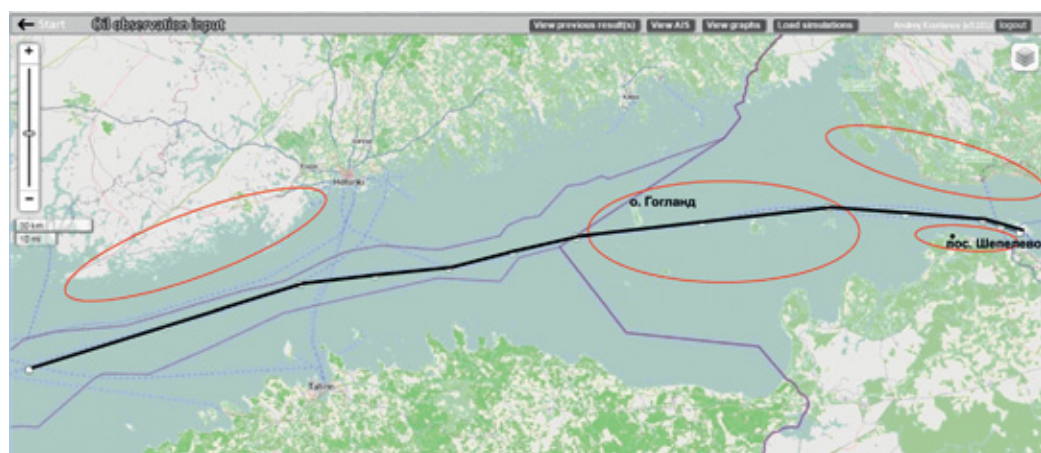
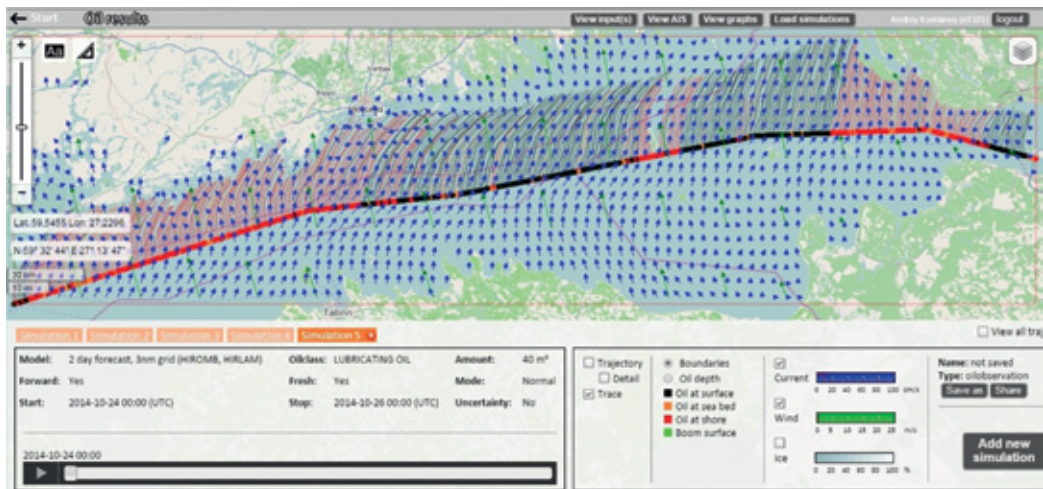


Рис. 3.30. Участок судоходной трассы в Финском заливе, выбранный для моделирования нефтяных разливов (чёрная линия), и районы потенциального риска нефтяного загрязнения берегов и островов (красные эллипсы). Синие линии разграничивают исключительные экономические зоны Финляндии, России и Эстонии. Синие пунктирные линии — основные судоходные трассы [Костяной, Булычева, 2014]



Р и с. 3.31. Дрейф нефтяного загрязнения 24 октября 2014 г. [Костяной, Булычева, 2014]



Р и с. 3.32. Дрейф нефтяного загрязнения 23 сентября 2014 г. [Костяной, Булычева, 2014]

Всего в 11 случаях из 61 нефтяному загрязнению подвергся южный берег РФ в крайней восточной части Финского залива, расположенный между КЗС и пос. Шепелево (см. рис. 3.32). Это объясняется редкими случаями ветров северных румбов. На том же рисунке видно, что при северном ветре происходит загрязнение нескольких мелких островов, находящихся на акватории РФ в Финском заливе. При западном или восточном ветре происходит дрейф нефтяного загрязнения вдоль судовой трассы на восток и запад, соответственно, и загрязнение только островов на акватории РФ, включая остров Котлин, через который проходит КЗС (см. рис. 3.33) [Костяной, Булычева, 2014].

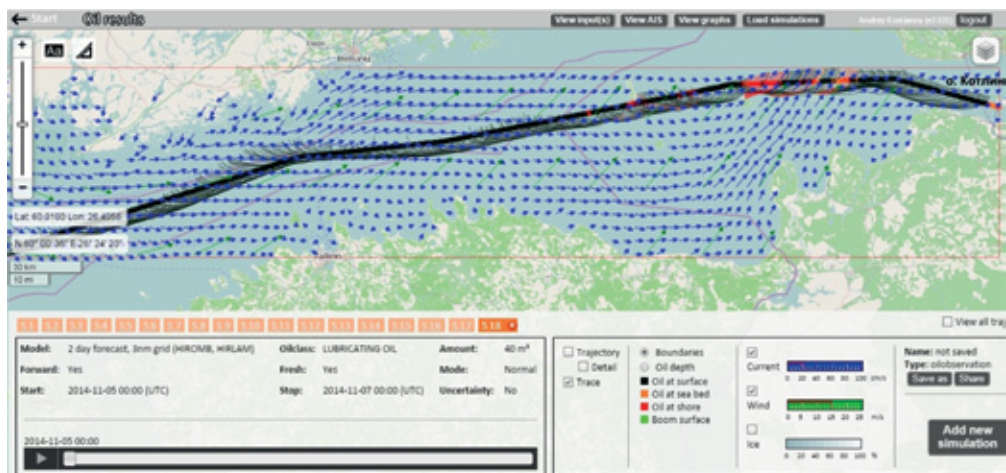


Рис. 3.33. Дрейф нефтяного загрязнения 5 ноября 2014 г. [Костяной, Булычева, 2014]

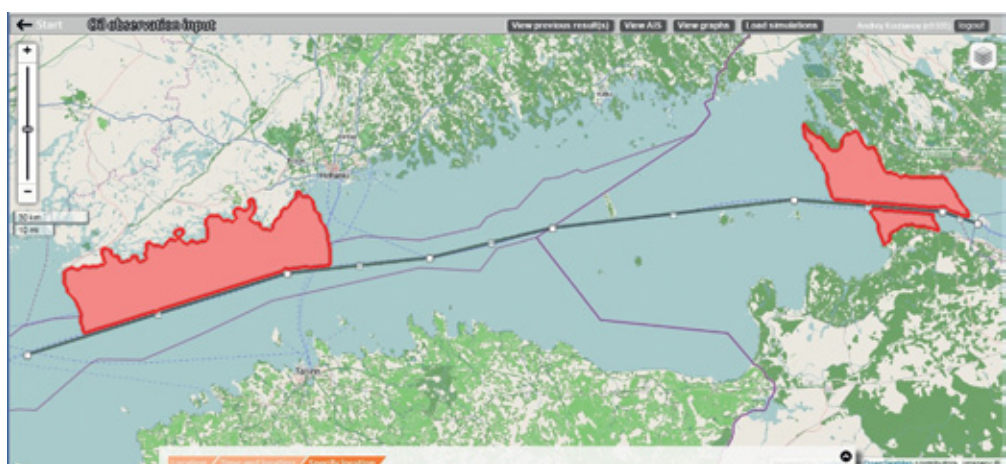
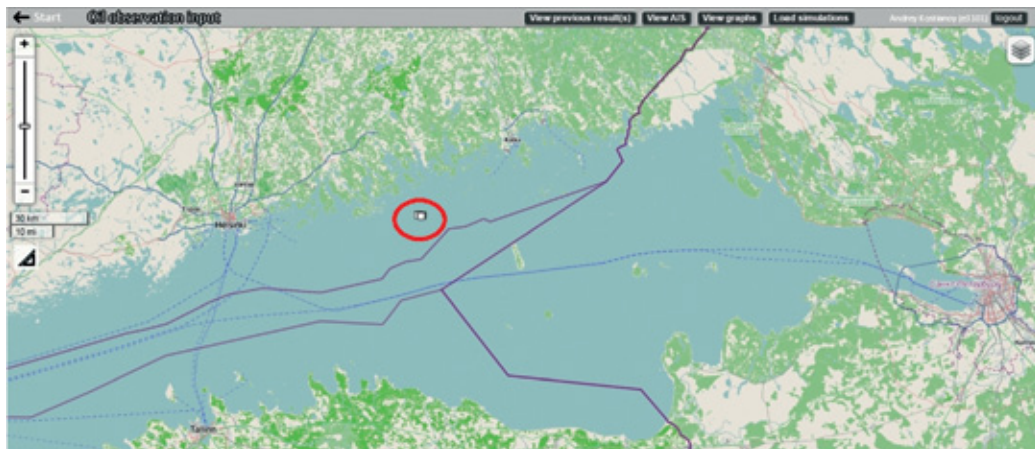
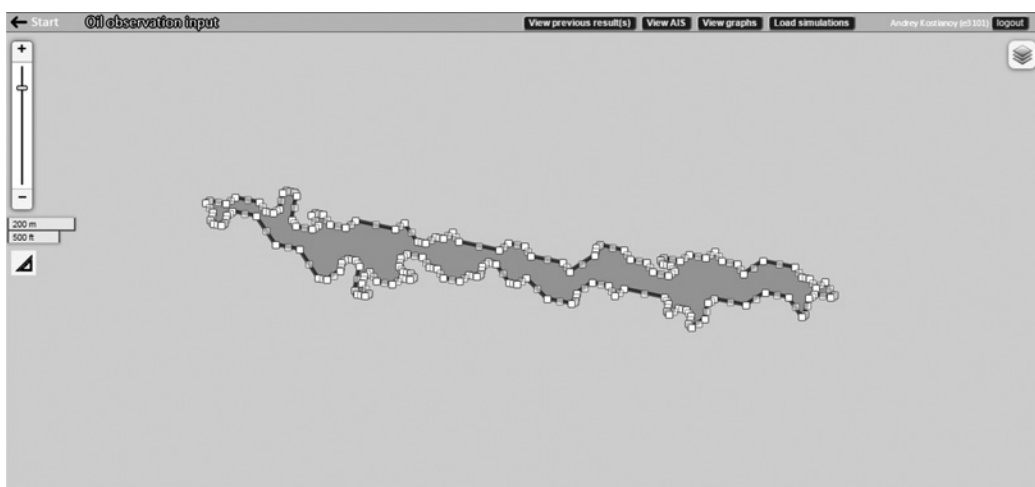


Рис. 3.34. Районы потенциального риска нефтяного загрязнения берегов Финского залива (красные области), выявленные в результате численного моделирования [Lavrova et al., 2016c]

Моделирование показало, что наибольшей потенциальной опасности нефтяного загрязнения подвергается о. Гогланд, южнее которого проходит судоходная трасса. В 61 модельном эксперименте было зафиксировано 57 случаев загрязнения острова нефтепродуктами. В 29 случаях оказались загрязнёнными берега нескольких мелких островов на акватории РФ. В 26 случаях подвергались опасности мелкие острова у берега Финляндии к западу от Хельсинки. В 20 случаях это был северный берег РФ в крайней восточной части Финского залива и только в 11 случаях — южный берег РФ. Все эти районы показаны на рис. 3.34. Ни одного случая загрязнения островов и побережья Эстонии зафиксировано не было [Костяной, Булычева, 2014; Lavrova et al., 2016c].

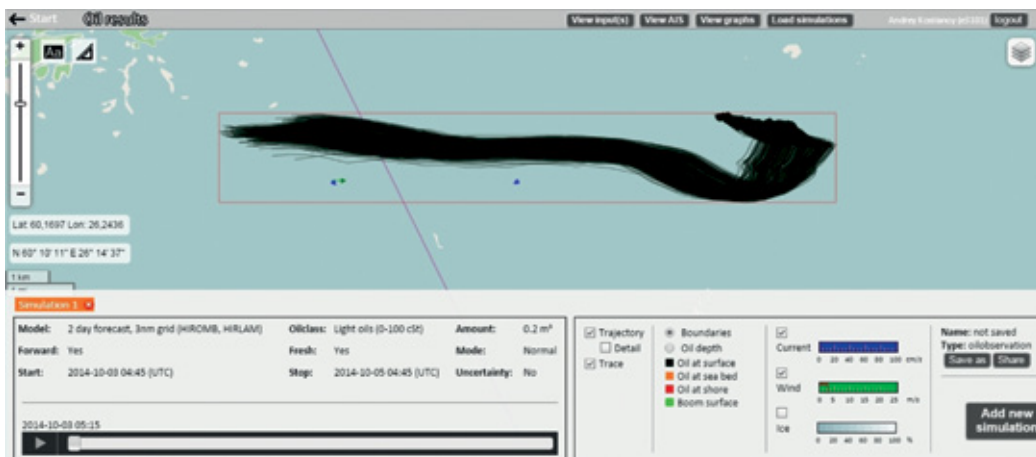


Р и с. 3.35. Положение нефтяного пятна, обнаруженного по спутниковым данным 3 октября 2014 г. (Seatrack Web, SMNI) [Костяной, Булычева, 2014]

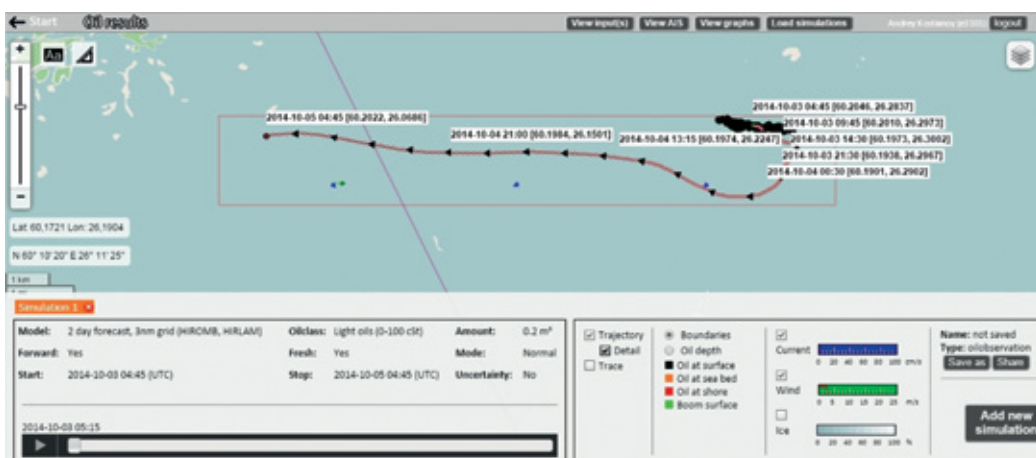


Р и с. 3.36. Форма и размеры нефтяного пятна, обнаруженного 3 октября 2014 г. (Seatrack Web, SMNI) [Костяной, Булычева, 2014]

Приведём один из примеров численного моделирования дрейфа и трансформации реальных нефтяных пятен, обнаруженных в Финском заливе. Так, например, по данным Шведского метеорологического и гидрологического института (SMNI) в период с 19 сентября по 18 ноября 2014 г. по спутниковым данным было обнаружено одно нефтяное пятно на акватории Финского залива (3 октября 2014 г., 04:39 UTC). Оно находилось в финской акватории в нескольких километрах от многочисленных островов (рис. 3.35). Пятно имело вытянутую форму, ориентированную с запада на восток, и площадь $0,2 \text{ км}^2$ (рис. 3.36). Ширина пятна составляла 50–200 м, длина — около 2 км.



Р и с. 3.37. Модельный расчет дрейфа нефтяного пятна, обнаруженного 3 октября 2014 г. (Seatrack Web, SMNI) [Костяной, Булычева, 2014]



Р и с. 3.38. Модельный расчёт траектории перемещения центра нефтяного пятна, обнаруженного 3 октября 2014 г. (Seatrack Web, SMNI) [Костяной, Булычева, 2014]

Моделирование дрейфа нефтяного пятна проводилось на 48 ч вперёд с момента обнаружения пятна на поверхности моря. Всего было получено семь карт, показывающих детальную форму пятна, его географическое положение, поля ветра и течений, а также результаты моделирования в различных видах. На рис. 3.37 и 3.38, в качестве примера, представлены результаты моделирования, показывающие, что дрейф нефтяного загрязнения будет происходить на запад, в результате чего оно значительно приблизится к берегам многочисленных островов побережья Финляндии [Костяной, Булычева, 2014].

Таким образом, было показано, что интерактивная оперативная модель Seatrack Web Шведского метеорологического и гидрологического института, предназначенная для моделирования дрейфа и трансформации нефтяных пятен различного типа, является также уникальным инструментом для оценки рисков нефтяного загрязнения всей акватории Балтийского моря, и, в частности, берегов и островов юго-восточной части Балтийского моря и Финского залива [Костяной, Булычева, 2014; Kostianoy et al., 2014b, 2015].

3.4. ИНТЕНСИВНОЕ ЦВЕТЕНИЕ ВОДОРΟΣЛЕЙ

3.4.1. Особенности цветения водорослей в Балтийском море

Под «цветением» воды понимают интенсивное развитие водорослей на поверхности или в толще воды, в результате чего она приобретает различную окраску. При этом цвет воды может варьировать от сине-зелёного, ярко-зелёного, серого до жёлто-зелёного, каштанового или ярко-красного, кирпично-красного и красно-бурого и коричневого (в зависимости от окраски организмов, вызывающих «цветение», и их численности). Массовому развитию водорослей вплоть до «цветения» воды способствует увеличение эвтрофирования водоёмов — насыщение водоёмов биогенными элементами, прежде всего азотом и фосфором, сопровождающееся ростом биологической продуктивности водных бассейнов. Увеличение эвтрофирования водоёмов происходит как под влиянием природных факторов (за тысячи и десятки тысяч лет), так и в значительно большей степени под влиянием антропогенных факторов (за годы, десятки лет).

Одной из наиболее актуальных экологических проблем Балтийского моря является эвтрофикация [Ecology of Baltic Coastal Waters, 2008; Elmgren, 1989; HELCOM, 2016a; Larsson et al., 1985; Rönnerberg, Donsdorff, 2004]. В Балтийском море раньше, чем в других морских акваториях были выявлены её основные признаки [Гидрометеорология..., 1994]. Уже к концу 1960-х гг. были замечены первые признаки эвтрофикации в открытом море. С тех пор концентрации биогенных элементов в поверхностных водах открытой части Балтики быстро увеличивались, но со значительными межгодовыми вариациями [Буканова, 2014; Орадовский и др., 1992; HELCOM, 2016a]. Источники, механизмы и проявления эвтрофикации связаны с географическими, физическими, химическими и биологическими условиями [Буканова, 2014; Гидрометеорология..., 1994; Орадовский, Юрковский, 1989; Савчук, 2005]:

- Балтийское море окружено экономически высокоразвитыми странами, в его бассейне живут более 85 млн человек, в том числе 40 млн непосредственно на побережье;
- мелководные пороги ослабляют водообмен с Северным морем и между основными заливами (см. разд. 3.1);
- положительный водный баланс и эстуарный тип циркуляции вод поддерживают постоянную стратификацию вод, ослабляющую вертикальный обмен;
- на водосборной площади Балтийского моря находятся многочисленные промышленные предприятия, и ведётся интенсивное сельское хозяйство.

Сравнительно низкая солёность моря ограничивает развитие как морских, так и пресноводных видов, поэтому количественный и качественный состав фитопланктона в море обеднён. Наибольшее видовое разнообразие характерно для сине-зелёных и диатомовых водорослей [Александров и др., 2012]. Региональное распределение фитопланктона Балтийского моря обусловлено неоднородностью солёности и температурного режима, а большие региональные различия в биологической продуктивности — неравномерным распределением минеральных питательных солей, что особенно важно для диатомовых и сине-зелёных водорослей [Гидрометеорология..., 1994].

Развитие фитопланктона в Балтийском море носит ярко выраженный сезонный характер. Зимний период характеризуется низкой биомассой фитопланктона и низкой продуктивностью. Весной с увеличением солнечного освещения и установлением термоклина начинается развитие диатомовых водорослей. Весенняя вспышка наблюдается в марте в западной части моря, в апреле — в центральной, в конце апреля — в восточной [Буканова, 2014; Elder, 1975, 1979; Hållfors et al., 1981].

В начале биологического лета (июнь) вследствие обеднения поверхностных вод биогенными элементами и в условиях устойчивых галоклина и термоклина, диатомовые водоросли уступают место сине-зелёным [Hobro, 1979]. Основные скопления водорослей сосредотачиваются в верхнем (0–30 м) слое воды [Гидрометеорология..., 1994]. Осенью при условии выравнивания температуры водных масс по вертикали и активном перемешивании вод происходит вынос биогенов из глубинного слоя, что обуславливает второй максимум развития диатомовых водорослей [Hållfors et al., 1981].

Основное внимание исследователей, занимающихся мониторингом вредоносного цветения водорослей, приковано к летнему цветению цианопрокариотов. Цианопрокариоты (цианобактерии, сине-зелёные водоросли) — один из основных компонентов фитопланктона морских и пресноводных экосистем, самые древние фотосинтезирующие организмы на планете, возраст которых составляет 3,5 млрд лет. Высокая скорость размножения, определённые эколого-физиологические свойства: плавучесть, способность к фиксации азота и образованию акинет (покоящихся клеток цианобактерий с утолщённой оболочкой, большим количеством запасных питательных веществ и пигментов), устойчивость к неблагоприятным факторам, интенсивное развитие в тёплое время года, хорошая адаптация к экстремальным условиям, способность к эндосимбиозу и созданию мутуалистических ассоциаций; способствуют их широкому распространению от тропиков до полярных регионов и доминированию в водах разной трофии [Paerl, Huisman, 2009]. При определённых благоприятных условиях их массовое развитие наносит серьёзный экономический ущерб и представляет опасность для обитателей водоёмов, а также для жизни и здоровья людей. Способность образовывать крупные слизистые колонии и синтезировать токсины защищает их от выедания. Считается, что массовому развитию цианопрокариот способствует эвтрофирование, которое может быть обусловлено и современным изменением планетарного климата [Beardall et al., 2009; Paerl, Huisman, 2009; Peperzak, 2003], вызывающим увеличение температуры, стратификации, солёности и содержания биогенных элементов поверхностных вод. Совместное влияние положительных температур и высокой концентрации биогенных веществ аддитивно воздействует на увеличение темпов роста токсичных видов цианопрокариот [Davis et al., 2009].

Регулярное летнее «цветение» потенциально токсичных сине-зелёных водорослей вызывает неблагоприятные изменения водного режима, ухудшает кислородный режим водоёма, вызывает замор рыбы и имеет многие другие неблагоприятные последствия. Например, в прибрежных районах Калининградского залива в период интенсивного цветения цианобактерий вся поверхность воды покрыта плотной зеленоватой или зеленовато-бурой плёнкой и имеет неприятный запах (рис. 3.39).

Несмотря на пристальное внимание исследователей к изучению вредоносного цветения сине-зелёных водорослей, до сих пор ещё нет чётких представлений о механизмах, контролирующих видовой состав цианопрокариот, динамику показателей их обилия в зависимости от типологии водоёмов, их географического положения и мультипликативного лимитирования биотическими и абиотическими факторами среды. Изучение влияния только одного фактора или сочетания нескольких до сих пор ещё не дали точно прогнозируемых результатов по изменению видового состава и степени развития цианопрокариот. В период активного размножения они сами могут менять условия водной среды (например, повышать температуру воды, что хорошо видно на ИК-изображениях).



Р и с. 3.39. Поверхность воды в Калининградском заливе во время интенсивного цветения цианобактерий, 29 июля 2014 г. (Фотография Лавровой О. Ю.)

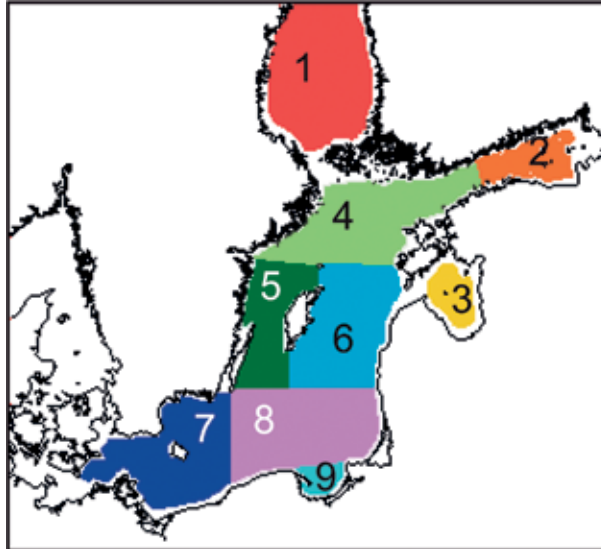
3.4.2. Мониторинг интенсивного цветения воды сканерами цвета

Изменение цветности и мутности воды в результате интенсивного развития цианобактерий открывает широкие возможности для спутникового мониторинга экологического состояния Балтийского моря, в первую очередь с помощью оптических сенсоров, предоставляющих информацию в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного спектра. Спутниковые спектрорадиометры регистрируют величины яркости рассеянного и отражённого излучения, восходящего с поверхности моря, которое обусловлено наличием в морской воде оптически активных компонентов: хлорофилла-*a*, взвешенного неорганического вещества и окрашенного растворенного органического вещества — «жёлтого вещества» [Кронберг, 1988; Лаврова и др., 2011a; Doerffer, Schiller, 1997]. Наиболее затребованная характеристика, определяемая спектрорадиометрами, — концентрация хлорофилла. Этот параметр характеризует биомассу фитопланктона и является ключевой характеристикой для расчёта первичной продукции океана и морей. Это единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов [Копелевич и др., 2006]. Вопрос о построении алгоритмов расчёта концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым данным до конца не решён. Стандартные алгоритмы разработаны для открытых океанических вод и показывают существенное завышение значений для акватории Балтийского моря иногда более чем на порядок, по сравнению с натурными данными [Копелевич и др., 2016; Darecki et al., 2008]. Вследствие этого, основное внимание уделяется разработке региональных алгоритмов [Копелевич и др., 2015; Darecki, Stramski, 2004; Rogalus, Watzin 2008], которые основываются на использовании данных подспутниковых измерений. В лаборатории оптики океана Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН создаются и совершенствуются региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла для морей России, в частности для различных акваторий Балтийского моря [Копелевич и др., 2015, 2016].

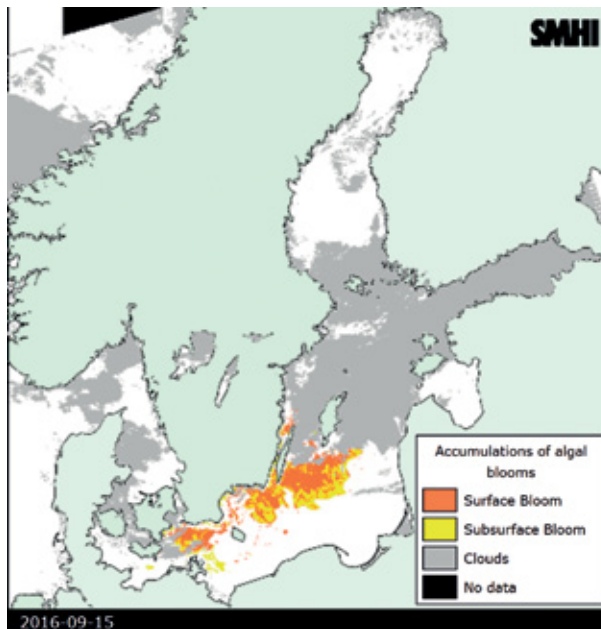
Данные спутникового дистанционного зондирования используются для выявления областей цветения водорослей, начиная с 1979 г. Первым сканером цвета являлся Coastal Zone Color Scanner (CZCS, NASA), который проработал на орбите до 1986 г. [Novis et al., 1980]. Спутниковые наблюдения цветения в Балтийском море проводятся уже более 35 лет [Kahru, Elmgren, 2014]. Поскольку основное внимание уделяется, в первую очередь, пространственному распространению и оценке биомассы цианобактерий, то спутниковый мониторинг ограничивается только четырьмя месяцами с июня по сентябрь. Как уже отмечалось выше, пространственное распределение и интенсивность цветения фитопланктона существенно зависит от региона. Условное районирование акватории Балтийского моря представлено на рис. 3.40.

Для каждого района определяется пространственная и временная (месячная, годовая) изменчивость интенсивности цветения. Ведущая роль в этих исследованиях принадлежит Шведскому метеорологическому и гидрологическому институту (SMHI) и экспертам Хельсинской комиссии (HELCOM).

На сайте SMHI ежедневно в летний период оперативно выкладываются карты цветения водорослей в Балтийском море (<http://www.smhi.se/en/weather/sweden-weather#>), построенные на основе данных спектрорадиометра MODIS, и даётся прогноз их распространения на 24 часа вперёд.



Р и с. 3.40. Районирование Балтийского моря: 1 — Ботническое море; 2 — Финский залив; 3 — Рижский залив; 4 — Северная часть открытой Балтики; 5 — Западный Готландский бассейн; 6 — Восточный Готландский бассейн; 7 — Юго-юго-западная часть открытой Балтики (включая Борнхольмский и Арконский бассейны); 8 — Юго-юго-восточная часть открытой Балтики; 9 — Гданьский залив [Kahru et al., 2007]



Р и с. 3.41. Карта проявления поверхностного и подповерхностного цветения водорослей за 15 сентября 2016 г. по данным прибора MODIS (©SMHI, 2016)

На рис. 3.41 представлена карта проявления поверхностного и подповерхностного цветения водорослей за 15 сентября 2016 г. Интенсивное цветение, как видно из рисунка, наблюдается в южной части Готландского бассейна и в юго-юго-западной части открытой Балтики. Естественно, данные карты не могут полностью отражать реальную картину, поскольку облачность является существенным ограничением для наблюдений в оптическом диапазоне. Так, например, в сентябре 2016 г. информативными были данные только за 19 дней, и то для очень ограниченного числа районов. Для восточной части Финского залива, которая считается наиболее подверженной цветению, за сентябрь не было ни одного информативного изображения.

Подробные годовые отчёты, составленные на основе совместного анализа спутниковых данных и контактных измерений, доступны на сайте HELCOM (<http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends>). В годовом отчёте за 2015 г. [Öberg, 2016] отмечается, что массовое цветение цианобактерий началось необычно поздно. Это явилось следствием холодной и ветряной погоды. Площадь и интенсивность цветения увеличивались в течение первых двух недель августа и достигли максимума 14 августа 2015 г., когда площадь покрытия составила 125 тыс. км² (рис. 3.42). Наиболее интенсивное цветение наблюдалось в северной части открытой Балтики (см. рис. 2.15) и в Финском заливе. В Ботническом море цветение началось в середине августа и продолжалось до 4 сентября. В целом по интенсивности и охвату территории цветение 2015 г. находилось на среднем уровне по сравнению с предыдущими годами.

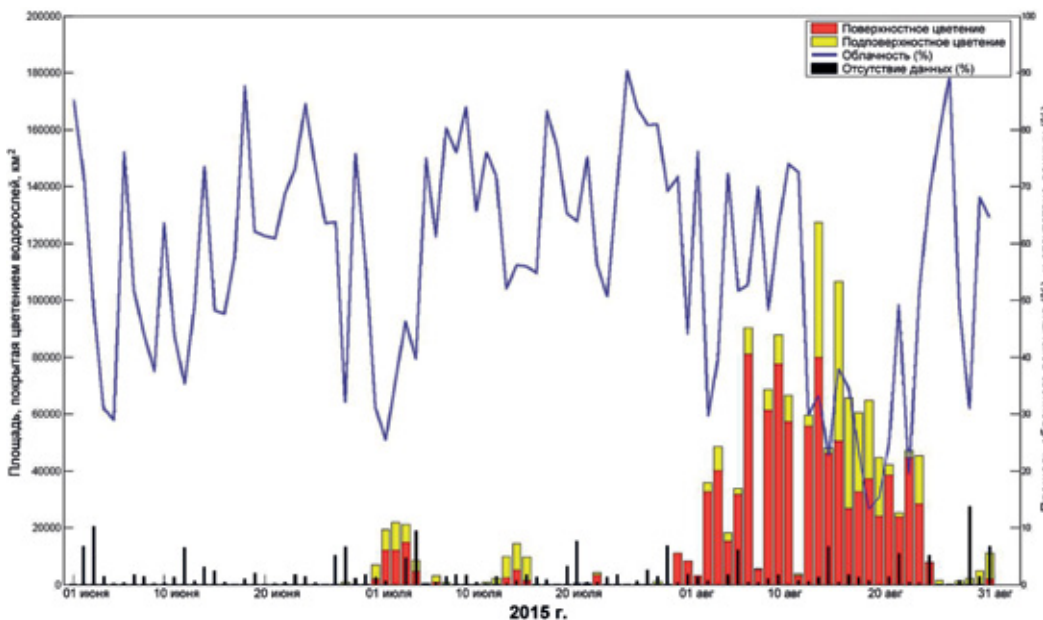


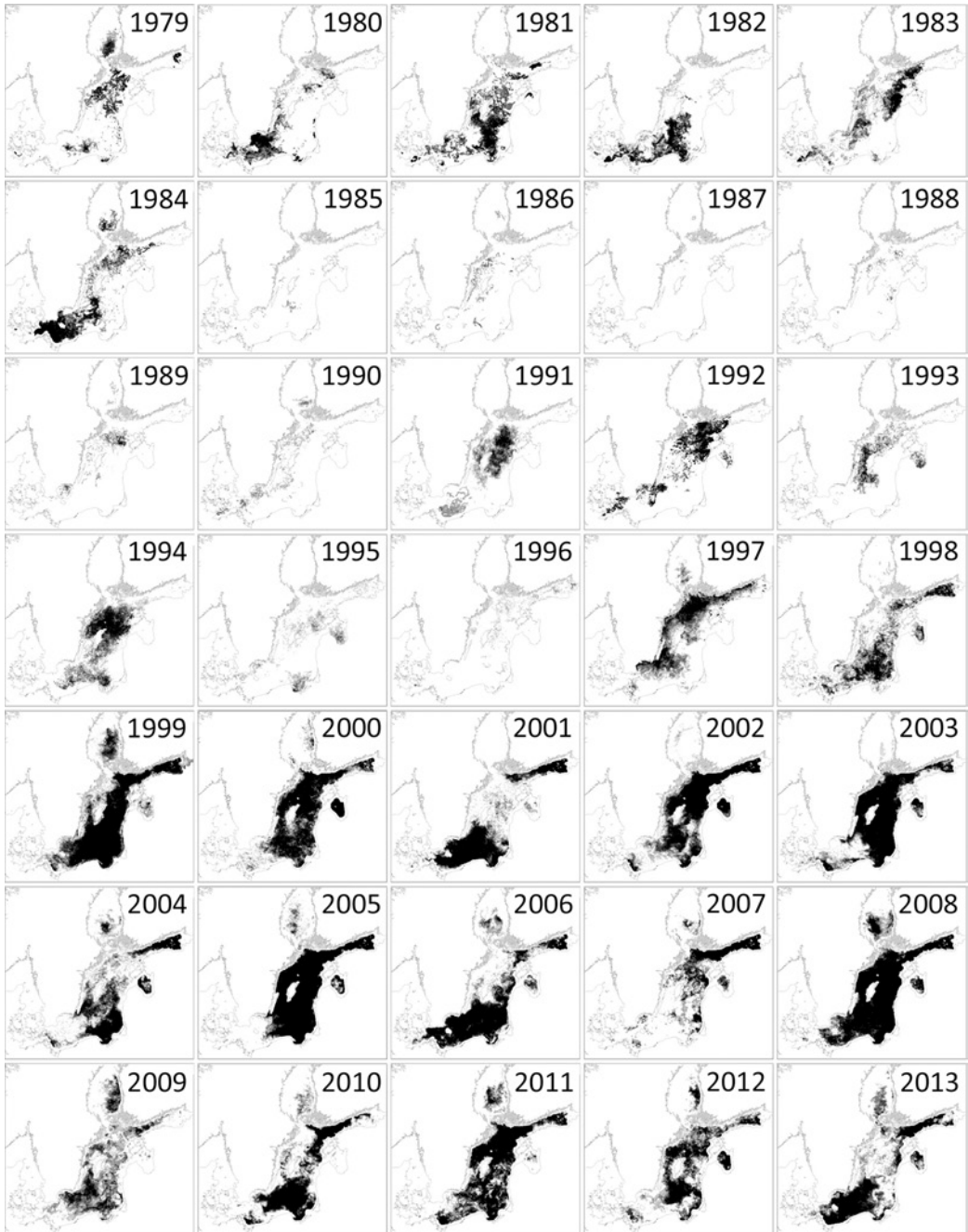
Рис. 3.42. Площади, покрытые поверхностным (красные столбики) и подповерхностным (жёлтые) цветением цианобактерий в июне-августе 2015 г. Синяя линия показывает интегральное значение облачного покрова в процентах от общей площади Балтийского моря, чёрные линии отмечают отсутствие данных (©HELCOM, 2016)

Мониторинг цветения водорослей невозможно проводить только на основе данных спутникового зондирования, особенно, если это касается определения типа водорослей. Страны Балтийского региона проводят регулярные измерения с борта научно исследовательских судов. В России исследования концентрации *хлорофилла-а* и отбор проб проводился в рамках комплексного производственно-экологического мониторинга по программе ООО «Лукойл-Калининградморнефть» сотрудниками Атлантического отделения Института океанологии ИО РАН с борта НИС «Профессор Штокман» [Нефть..., 2012]. Как показывают судовые измерения, различные районы Балтийского моря характеризуются различным видовым составом цианобактерий и различной величиной их биомассы. По результатам судовых измерений, проведённых исследователями из Финского института изучения окружающей среды (Finnish Environment Institute) в июле и августе 2015 г. с борта НИС “Aranda”, наиболее распространёнными видами азотофиксирующих сине-зелёных водорослей, являлись *Aphanizomenon*, *Nodularia* и *Dolichospermum* (<http://www.smhi.se/publikationer/2.1054>). Следует отметить, что это потенциально токсичные водоросли. Так, например, *Aphanizomenon flos-aqua* продуцирует цитотоксины, вызывающие дерматиты и оказывающие воздействие на нервную систему рыб и человека [Manual..., 1995]; а *Nodularia spumigena* синтезирует гепатоксин-печёночный яд нодуларин, который опасен для плавниковых рыб и человека [Burkholder, 1998]. В пределах Гданьского бассейна вклад потенциально токсичных видов водорослей в общую биомассу в летний период составляет до 70 % по численности и 90 % по биомасс фитопланктона [Александров и др., 2012; Буканова, 2014; Нефть..., 2012].

Хотя, как постоянно отмечается в научной литературе, методика оценки различных индексов цветения для Балтийского моря поменялась в 2010 г., и данные за 1997–2009 гг. некорректно сравнивать с данными 2010–2015 гг., межгодовая и пространственная изменчивость на качественном уровне хорошо просматривается (рис. 3.43).

Для качественного сравнения использовался индекс FCA (The areal fraction with cyanobacteria accumulations), который вычислялся как отношение числа выявленных на спутниковых изображениях скоплений водорослей к числу свободной от облачности поверхности на пиксел в течение сезона цветения (июль-август). Многолетние спутниковые наблюдения показывают, что акватории Балтийского моря, подверженные цветению цианобактерий, увеличиваются и охватывают практически всё море, не захваченным остаётся только Ботнический залив. Наиболее интенсивное цветение наблюдалось в 2005 и 2008 гг. Несмотря на сильную межгодовую и пространственную изменчивость, восточная часть моря сильнее охвачена цветением, чем западная. К наиболее подверженным цветению цианобактерий относятся следующие районы: Финский залив, районы вокруг о. Готланд, Гданьский залив, в отдельные годы Рижский залив. Полностью в течение всего сезона покрыты цветением Куршский и Вислинский заливы.

На спутниковых изображениях видимого диапазона зоны повышенного цветения отчётливо проявляются в виде ярко-зелёных или зеленовато-бурых областей. Сигнал, регистрируемый датчиками в видимом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле: фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах. Гидрозоли можно также рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений. Формируемые ими фронтальные зоны, как правило, соответствуют линиям тока.



Р и с. 3.43. Карта средних значений FSA за июль-август 1979–2013 гг. в Балтийском море. Увеличение значений FSA дано в градациях серого от светлого к тёмному [Kahru, Elmgren, 2014]

Использование последовательных изображений для одной и той же акватории позволяет получить уникальную информацию о поле поверхностных течений, выделить основные гидродинамические структуры, определяющие мезомасштабную изменчивость поля течений в изучаемом районе (рис. 3.44). По данным MODIS Terra за 4–6 августа 2004 г. были восстановлены скорость и направление течения в Гданьском заливе. Средняя скорость течений составила 15 см/с [Лаврова и др., 2011; Lavrova et al., 2008a, 2010].

В частности на спутниковых изображениях видимого диапазона юго-восточной Балтики в период интенсивного цветения цианобактерий особенно хорошо проявляются характерные для этого района вихри и вихревые диполи (рис. 3.45). Большой научный и практический интерес представляет исследование влияния этих вихревых структур на перенос различного рода загрязнений морской поверхности, в частности нефтяных загрязнений [Kostianoy et al., 2014b].

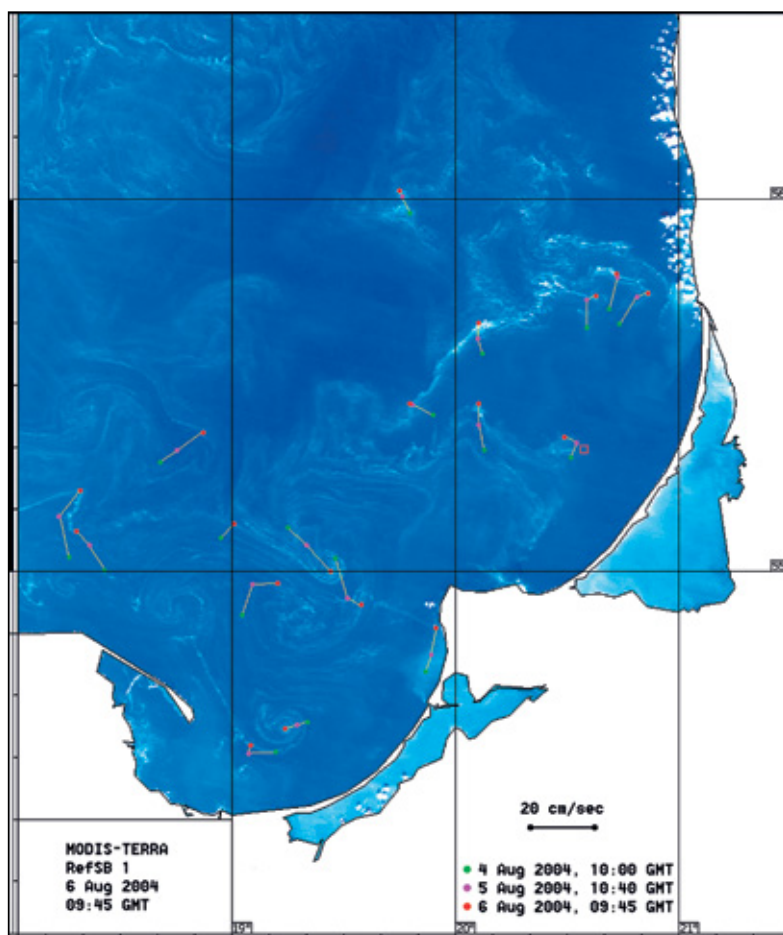
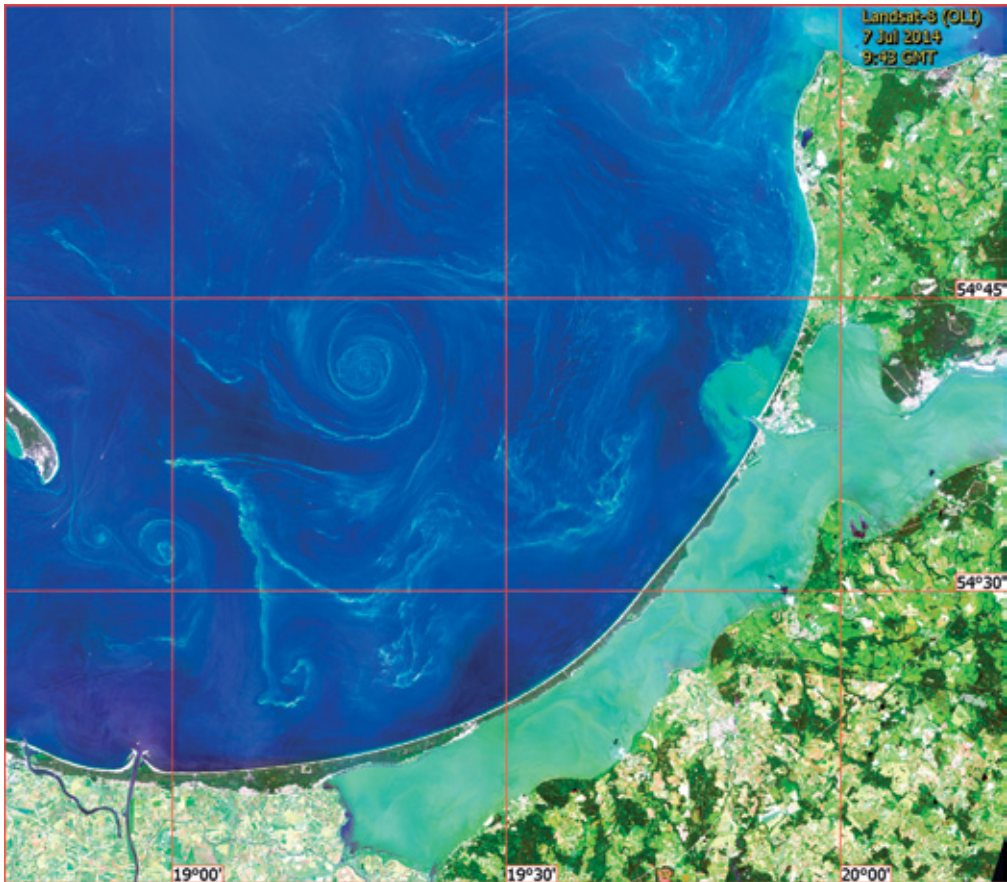


Рис. 3.44. Структура, направление и скорость течений, восстановленные по данным MODIS Terra за 4–6 августа 2004 г.



Р и с. 3.45. Вихревые структуры в Гданьском заливе, проявляющиеся на цветосинтезированном изображении OLI Landsat-8 (4-3-2 спектральные каналы) от 7 июля 2014 г. за счёт рассеяния на гидрозолях — фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах

3.4.3. Выявление областей интенсивного цветения водорослей по данным спутниковой радиолокации

Идентификация и картографирование областей интенсивного цветения водорослей традиционно и успешно проводится на основе спутниковых данных оптического диапазона. Преимуществами современных многоканальных сенсоров оптического диапазона является их высокое пространственное разрешение при широкой полосе обзора, однако основным ограничением возможности их применения является зависимость от освещённости и погодных условий (облачность). Следует отметить, что существуют естественные ограничения на использование спутниковых данных оптического диапазона для выявления районов интенсивного цветения на Балтике, так как акватория Балтийского моря достаточно часто полностью или частично покрыта облачностью.

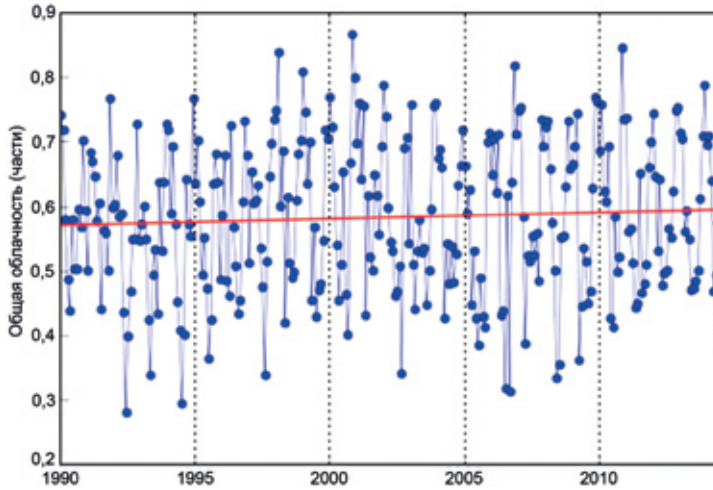
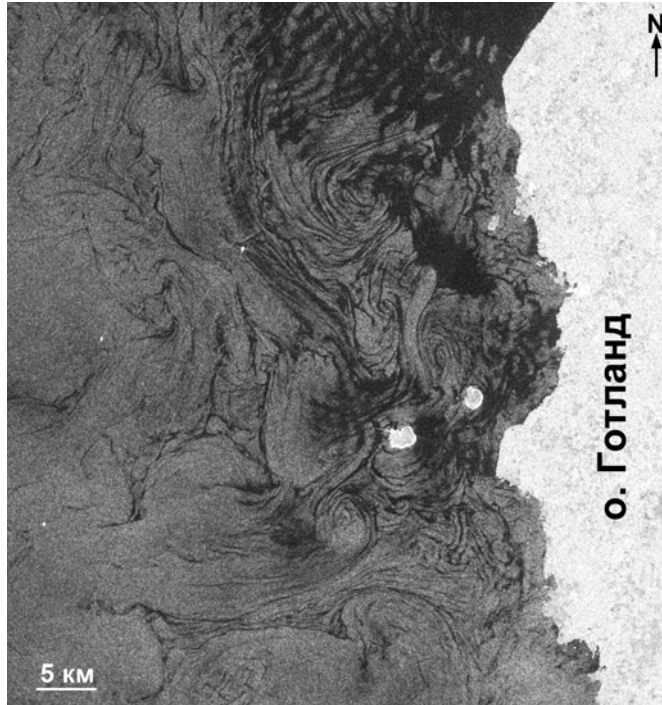


Рис. 3.46. Сезонная и межгодовая изменчивость общей облачности (в частях) в районе Юго-восточной Балтики ($18-21^{\circ}$ в.д.; $54,5-56,5^{\circ}$ с.ш.) за период с января 1990 по декабрь 2014 г. Синие точки — исходные данные, красная линия — линейный тренд (по данным NASA MERRA)

Исследование межгодовой изменчивости облачного покрова в Юго-Восточной Балтике с января 1990 г. по декабрь 2014 г. по ежемесячным данным NASA MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) показало, что облачность в среднем покрывает 60 % исследуемой акватории (рис. 3.46), причём только летом она охватывает от 30 до 50 % акватории, а зимой превышает 70 %.

Как известно, радиолокационные наблюдения могут проводиться вне зависимости от наличия облачности и солнечной освещённости. В период интенсивного цветения водорослей на поверхности моря образуется большое количество биогенной плёнки, которая выглаживает морскую поверхность за счёт подавления мелкомасштабной составляющей волнения. Скопление темных полос пониженного радиолокационного рассеяния (так называемых сликов) может служить индикатором наличия областей цветения водорослей (рис. 3.47). Использование данных спутникового радиолокационного зондирования позволяет выявить области цветения не только цианобактерий, но и любых других типов фитопланктона, выделяющих высокомолекулярные соединения, формирующие поверхностную плёнку. Опираясь на данный метод диагностики наличия цветения, определялись сроки начала цветения фитопланктона и районы его распространения. По нашим оценкам, например, в 2016 г. цветение началось в конце марта в Западном и Восточном Готландских бассейнах; в этом районе на РЛИ наблюдалось обширное скопление сликов биологического происхождения (см. рис. 3.47).

Биогенные плёнки являются пассивными трассерами поверхностных течений на радиолокационных изображениях. Вовлекаясь в орбитальные движения, они достаточно детально прорисовывают вихри и вихревые диполи (см. рис. 3.47). Это даёт возможность не только выявить области цветения, но и оценить направление их распространения под действием приповерхностных течений.



Р и с. 3.47. Субмезомасштабные вихревые структуры, проявляющиеся за счёт сликовых полос на РЛИ SAR-C Sentinel-1A, полученном 4 апреля 2016 г.

Данный метод выявления районов цветения имеет свои ограничения: слики не различимы в областях поверхностных проявлений ослабления приповерхностного ветра (областях штиля или ветровой тени) и разрушаются при скорости ветра более 8–10 м/с.

Исследователями из ИКИ РАН был предложен оригинальный метод выявления областей интенсивного цветения водорослей на основе данных спутниковой радиолокации, который может применяться и при малых скоростях приповерхностного ветра [Лаврова, Митягина, 2016; Митягина, Лаврова, 2014; Lavrova et al., 2014a; Mityagina, Lavrova, 2014]. Этот метод базируется на выявлении особых типов долгоживущих следов за судами, которые идентифицируются на РЛИ в зонах интенсивного цветения фитопланктона.

Радиолокационные образы надводных судов и следов за ними были обнаружены уже на первых радиолокационных изображениях, полученных со спутника SeaSat в 1978 г. [Fu, Holt, 1982]. С развитием технологий спутниковой радиолокации возрастает интерес к радиолокационным образам следов, оставленных движущимися надводными судами, так называемым кильватерным следам [Ермаков, Капустин, 2010; Soloviev et al., 2010; Zilman et al., 2004]. Радиолокационные образы следов за движущимися наземными судами отличаются хорошо узнаваемой структурой и могут проявляться либо в виде турбулентного следа, либо как V-образные «усы» [Pichel et al., 2004].

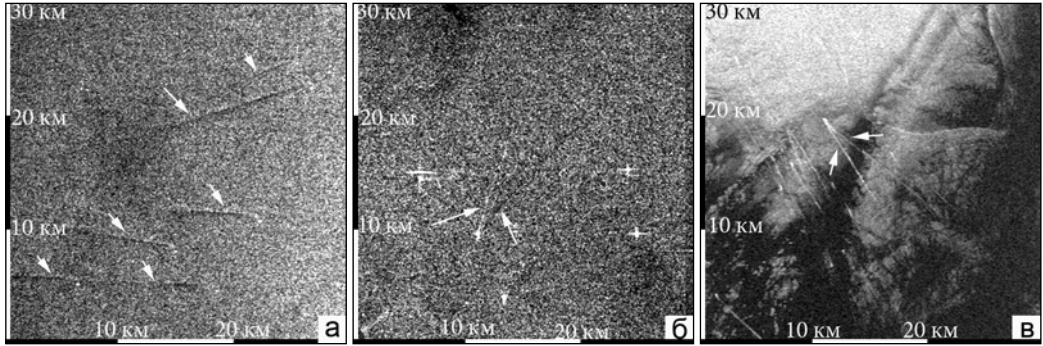


Рис. 3.48. Проявления корабельных следов различного типа на РЛИ (фрагменты 30×30 км): *a* — турбулентные следы за кораблями, длина следов 8–15 км, ASAR Envisat, 22.08.2009, 19:57 UTC; *б* — «усы» за кораблём, длина 8 км, растров угол 40°, ASAR Envisat, 10.09.2009, 19:59 UTC; *в* — «усы» за кораблём, длина 9 км, растров угол 40°, ASAR Envisat, 14.04.2011, 20:39 UTC

Турбулентность, возникающая вследствие обрушения волн, работа винтов корабля и перемещение корпуса, всё это приводит к возмущению, а затем к гашению коротких гравитационно–капиллярных волн за движущимся судном. Непосредственно за движущимся судном в воде с присутствием пены возникает область турбулентности, а далее распространяется протяжённая полоса выглаженной воды. Область выглаживания образуется в результате гашения коротковолновой составляющей спектра поверхностных волн в турбулентном следе вследствие повышения вязкости, понижения температуры и изменения эластичности и поверхностного натяжения в поверхностном слое. На радиолокационных изображениях следы этого типа проявляются как тёмная полоса, длиной несколько километров, начинающаяся в непосредственной близости от судна. Такого рода следы наиболее часто встречаются на РЛИ и обычно проявляются при умеренных ветрах, в диапазоне скоростей 2,5–7,5 м/с. Фрагмент РЛИ, на котором отчётливо видны проявления турбулентных следов длиной 8–10 км, представлен на рис. 3.48*a*.

Несколько реже, чем турбулентные следы, на РЛИ проявляются V-образные «усы», являющиеся отображением волн Кельвина, т.е. системы волн, возникающей при движении корабля и состоящей из расходящихся и поперечных волн. Фронт расходящихся волн образует с направлением движения корабля некоторый угол, зависящий от отношения скорости судна к глубине моря, а фронт поперечных волн перпендикулярен направлению движения корабля. Согласно классической теории волновая область ограничена сектором, симметричным относительно оси движения корабля, однако отображение волн Кельвина на РЛИ зависит от условий съёмки, в частности, от взаимного расположения азимутального угла и направления движения корабля, его размера, формы и скорости [Hennings et al., 1999; Reed, Milgram, 2002]. Из-за того, что расходящиеся волны распространяются под различными углами относительно направления съёмки, они различным образом проявляются на РЛИ. Широко распространённой является ситуация, когда один «ус» отображается как светлая полоса усиленного рассеяния, а другой — как тёмная полоса ослабленного рассеяния. Пример подобной ситуации представлен на рис. 3.48*б*. Возможны такие сочетания взаимного

расположения направления радиолокационной съёмки и курса корабля, при которых рассеяние радиолокационного сигнала происходит примерно одинаковым образом на обоих «усах», но такие ситуации встречаются реже. Как правило, длины V-образных следов на РЛИ меньше, чем длины турбулентных следов, возможно, это объясняется их меньшим временем жизни. Фрагмент РЛИ, на котором отчётливо видны проявления двух ярких белых «усов» за движущимся судном, представлен на рис. 3.48в.

Наши собственные исследования и опубликованные ранее результаты наблюдений, проведённых различными научными группами, показывают, что перечисленные выше проявления корабельных следов характеризуются длинами порядка первых десятков километров и временами жизни от десятков минут до одного часа.

На основе анализа спутниковых радиолокационных данных, полученных в ходе многолетнего мониторинга акваторий различных морей [Лаврова и др., 2012; Митягина, Лаврова, 2012; Lavrova et al., 2014a; Mityagina, Lavrova, 2012] нами выявлены многочисленные случаи проявлений корабельных следов, значительно отличающихся от описанных выше. Этот тип корабельных следов отображается на спутниковых радиолокационных изображениях в виде длинных светлых полос усиления обратнорассеянного сигнала. По спутниковым радиолокационным данным нами были восстановлены их пространственные и временные характеристики. Выяснилось, что эти корабельные следы являются относительно долгоживущими структурами, а их длины могут достигать сотен километров. Долгоживущие корабельные следы проявляются на радиолокационных изображениях в виде относительно узких полос повышенного радиолокационного сигнала, повторяющих маршрут движения корабля, длины которых могут достигать двухсот километров. В начале следа может выделяться яркая точка, соответствующая положению движущегося судна. Существенного расширения следа в направлении от судна, как правило, не наблюдается.

Пример проявления на РЛИ долгоживущих следов за кораблями приведён на рис. 3.49. Изображение получено над участком акватории к северу от Хельской косы (Польша, Гданьский залив), в зоне активного судоходства. Выделяются проявления четырёх долгоживущих следов, длины которых меняются в пределах 50–88 км. На врезке показаны вариации радиолокационного сигнала, вдоль линии разреза, идущей поперёк следа 1. Отчётливо проявляется усиление обратного рассеяния в следе за кораблём. Ширина следа составляет около 300 м при его видимой длине 88 км.

Диаграмма, отражающая распределение длин РЛ-образов долгоживущих корабельных следов, выявленных в акватории Балтийского моря за 2009, 2010 и 2011 гг. представлена на рис. 3.50.

Из диаграммы следует, что характерные длины следов этого типа составляют 10–50 км, однако в отдельных случаях их протяжённость превышает 150 км. Следует отметить также, что зачастую в связи с геометрией съёмки на РЛИ может отображаться не весь след, а только его часть. С другой стороны, в зонах интенсивного судоходства корабли могут следовать непосредственно один за другим или навстречу друг другу, и существует опасность посчитать два следа за один. Наблюдается также существенная межгодовая изменчивость распределения длины РЛ-образов долгоживущих корабельных следов. Исходя из протяжённости следов, выявленных по радиолокационным данным, и задавшись средней скоростью крупнотоннажных судов, оставляющих за собой долгоживущие следы, в 15 узлов (27 км/ч), получаем приблизительную оценку продолжительности жизни таких следов от одного до шести часов.

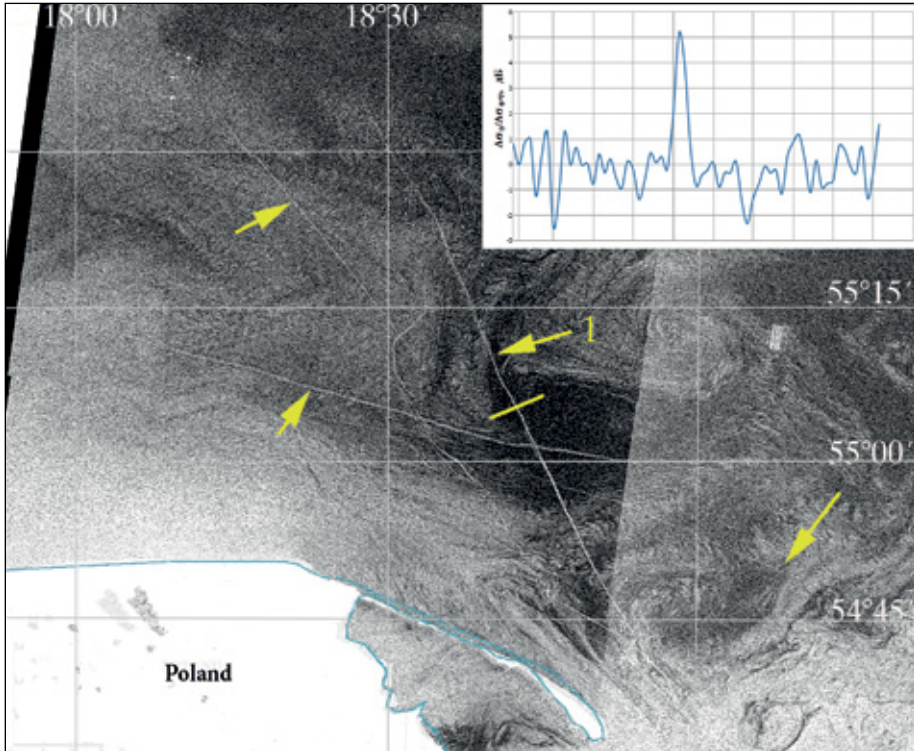
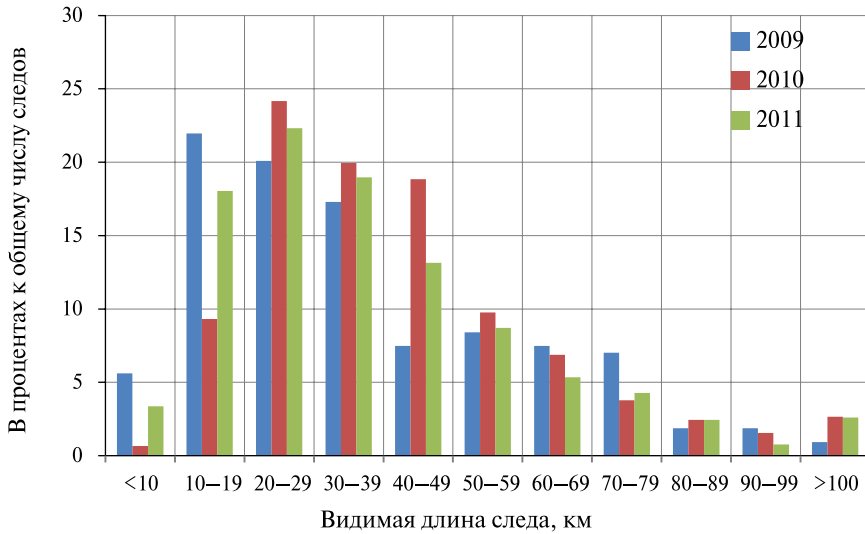


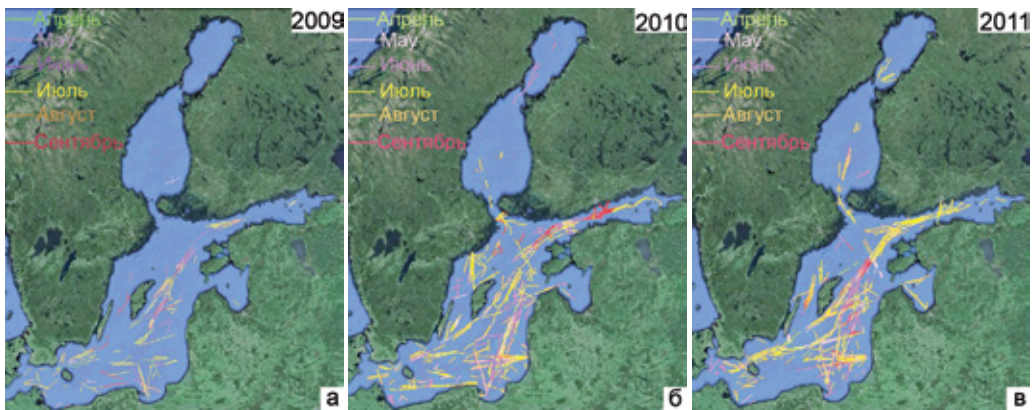
Рис. 3.49. Фрагмент ASAR Envisat изображения акватории Балтийского моря к северу от Хельской косы, полученного 9 июня 2009 г. На врезке приведён график вариаций радиолокационного сигнала, обусловленных поверхностными проявлениями долгоживущего следа за кораблём, вдоль отмеченной линии разреза

Карты-схемы пространственного распределения долгоживущих следов за кораблями в Балтийском море, выявленных на основе данных спутниковой радиолокации за 2009–2011 гг., приведены на рис. 3.51. На картах-схемах представлены данные за период с апреля по сентябрь, поскольку в остальные месяцы проявления долгоживущих следов практически не выявляются на радиолокационных изображениях акватории Балтийского моря.

Совместный анализ спутниковых радиолокационных данных и данных спутниковых сенсоров оптического диапазона позволяет предположить, что чаще всего долгоживущие корабельные следы, проявляющиеся как полосы повышенного радиолокационного рассеяния, наблюдаются в тех районах, где в момент наблюдения происходит интенсивное цветение фитопланктона. Как уже было отмечено выше, Балтийское море характеризуется двумя основными пиками цветения фитопланктона: весенним цветением диатомовых и динофлагеллят и летним цветением цианобактерий. Во время цветения диатомовых в приповерхностном слое присутствует относительно небольшое количество клеток, в то время как в период летнего цветения цианобактерии объединяются в агломерации, которые образуют поверхностные или подповерхностные скопления.



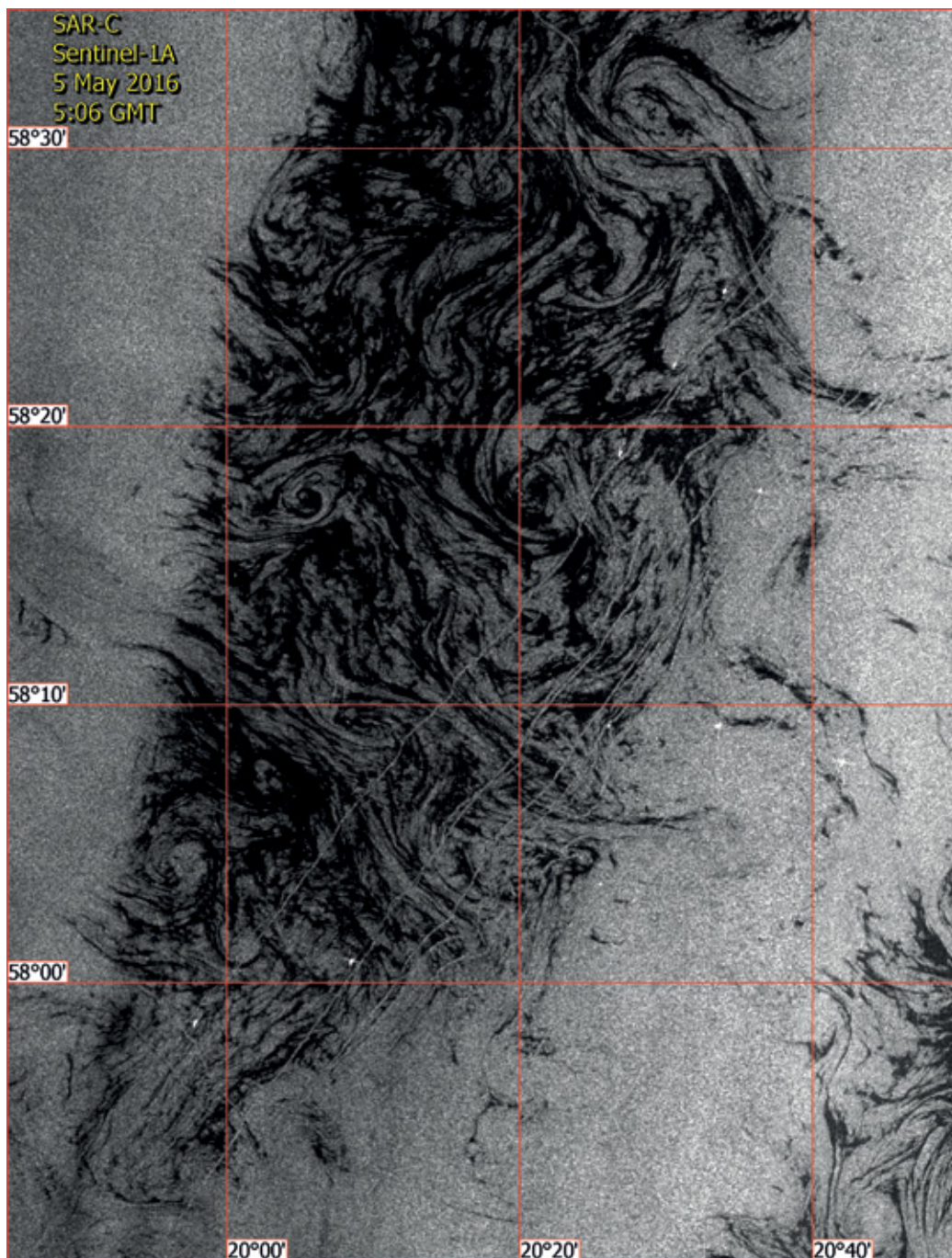
Р и с. 3.50. Распределение длины РЛ-образов долгоживущих корабельных следов, выявленных в акватории Балтийского моря в 2009–2011 гг.



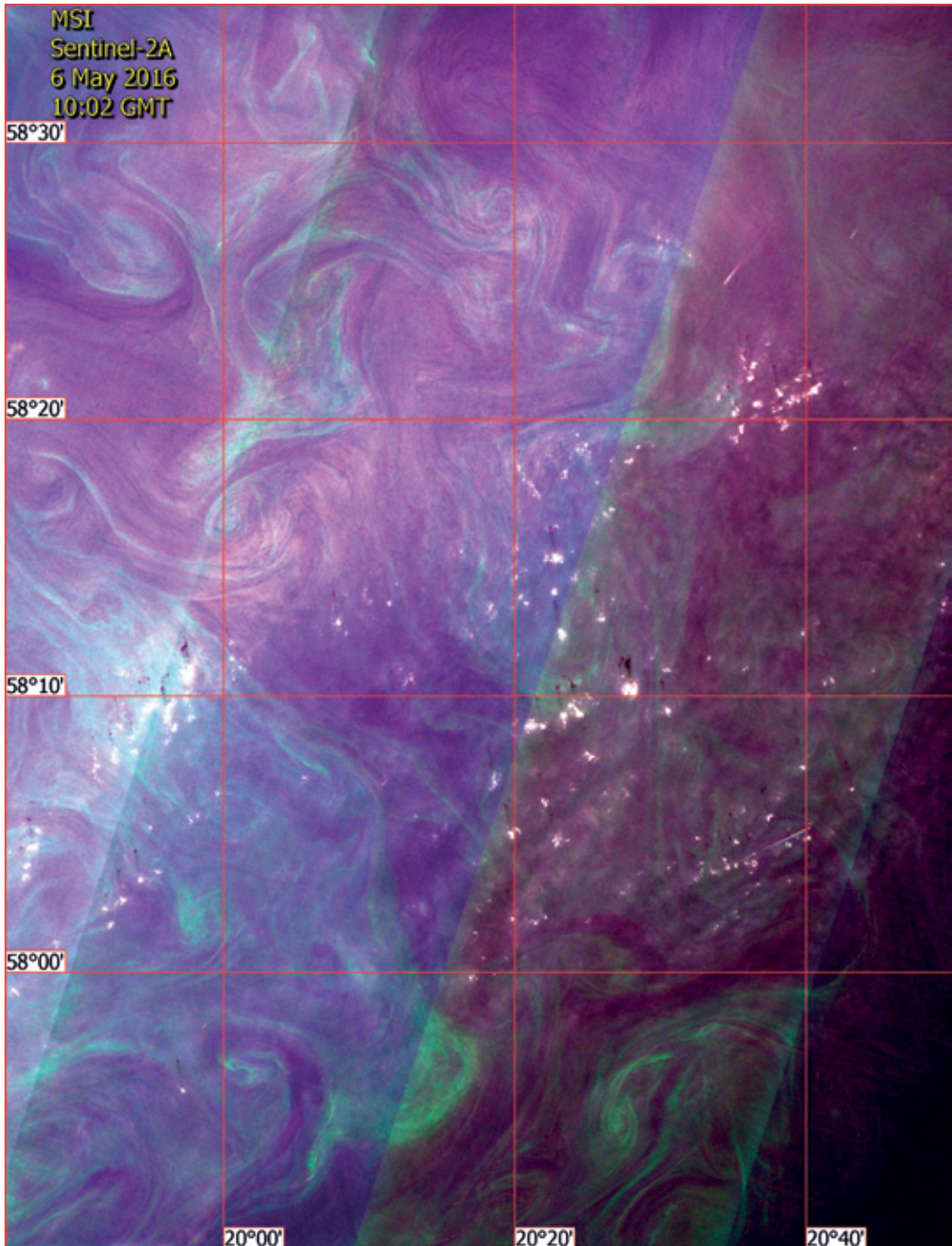
Р и с. 3.51. Обобщённые карты-схемы распределения долгоживущих следов за кораблями, выявленных на РЛИ Балтийского моря за: 2009 г. (а), 2010 г. (б) и 2011 г. (в)

Продолжительную жизнь корабельных следов в период летнего цветения можно объяснить следующим образом: судно, продвигаясь в области интенсивного цветения водорослей, оставляет за собой след чистой воды, на которой под действием ветра образуется рябь, отвечающая за усиление обратного рассеяния радиолокационного сигнала. Наши наблюдения показывают, что при относительно слабом ветре такой след долго не затягивается и существенно не расширяется.

На рис. 3.52а приведён фрагмент спутникового РЛИ, содержащего проявления долгоживущих следов за кораблями в районе основных судоходных трасс к северо-востоку от о-ва Готланд.



Р и с. 3.52а. Проявления долгоживущих корабельных следов на Sentinel-1A SAR изображении от 5 мая 2016 г.



Р и с. 3.52б. Проявление интенсивного цветения цианобактерий на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A (4-й, 3-й, 2-й спектральные каналы), полученном 6 мая 2016 г.

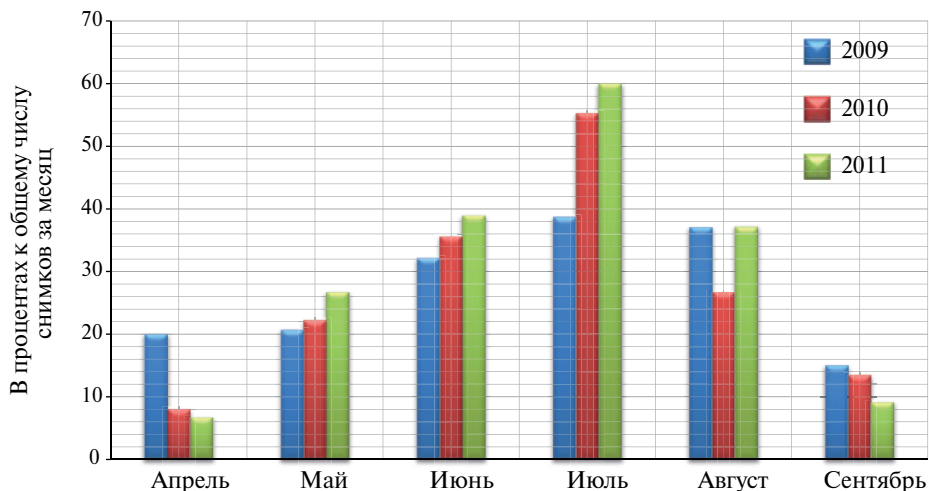


Рис. 3.53. Процентное соотношение радиолокационных изображений, содержащих проявления долгоживущих корабельных следов в различные месяцы 2009–2011 гг., к общему числу снимков за данный месяц

На рис. 3.52б приведён соответствующий ему фрагмент цветосинтезированного изображения, полученного сенсором MSI IC3 Sentinel-2A над тем же районом вскоре после проведения радиолокационной съёмки. На основе анализа цветосинтезированного изображения можно утверждать, что в этом районе наблюдалось интенсивное цветение сине-зелёных водорослей, которое в летнее время выступает в качестве хорошо регистрируемого трассера, отображающего положение конвергентно-дивергентных зон и, соответственно, структуру течений. Хорошо видны вихри, филаменты и грибвидные течения.

Для подтверждения гипотезы о том, что длинные яркие следы действительно наблюдаются в период интенсивного цветения фитопланктона, был проведён статистический анализ радиолокационных изображений ASAR Envisat, полученных над акваторией Балтийского моря в период с февраля 2009 по декабрь 2011 г. Для каждого месяца определялся процент, который составляют изображения, содержащие длинные следы повышенной яркости, к общему числу радиолокационных изображений, полученных за этот месяц. Результаты статистического анализа представлены на рис. 3.53.

Приведённые на рис. 3.53 результаты получены для всей акватории Балтийского моря, включая Ботнический и Финский заливы, что по большому счёту является некорректным, поскольку цветение в разных районах происходит в разные периоды. Однако эти характеристики представляются достаточно информативными для понимания межгодовой изменчивости интенсивности и продолжительности цветения фитопланктона и подтверждаются опубликованными данными о количественном содержании и видовой изменчивости фитопланктона в различных частях акватории Балтийского моря, полученными *in-situ* специалистами Шведского метеорологического и гидрологического института (SMHI) в ходе ежегодных ежемесячных круизов на исследовательском судне «Аргос» [Johansen, 2010; Johansen, Skjevik, 2009; Skjevik,

2011], а также данными о распространении и продолжительности цветения цианобактерий, сопровождающегося образованием поверхностных агломераций, приведенными в отчётах HELCOM [Hansson, Öberg, 2009, 2010, 2011].

В частности, высокий процент проявлений долгоживущих корабельных следов, выявленных на РЛИ за апрель 2009 г. (см. рис. 3.51а, 3.53), объясняется ранним началом цветения фитопланктона в южной и восточной Балтике в этом году. На графиках интегрального содержания хлорофилла, измеренного *in-situ* на станциях в бухте Ханё (Hanö Bight, южная Балтика), и восточнее острова Готланд (Gotland Deep, восточная Балтика), отчётливо выделяются пики, соответствующие проведённым в апреле измерениям, когда было зарегистрировано цветение диатомовых и динофлагеллят (рис. 3.54). Летнее же цветение цианобактерий не отличалось высокой интенсивностью и наблюдалось на протяжении лета в различных частях акватории Балтийского моря (рис. 3.55а). Соответственно, и диаграмма проявлений следов повышенной интенсивности для 2009 г. (см. рис. 3.53) имеет пологую форму без резких максимумов.

В 2010 г. весеннее цветение диатомовых и динофлагеллят средней интенсивности было зарегистрировано практически на всех измерительных станциях (см. рис. 3.54). Пик цветения цианобактерий приходился на июль месяц с последующим резким спадом в августе (рис. 3.55б). В апреле 2010 г. на РЛИ было выявлено достаточно много проявлений долгоживущих корабельных следов (см. рис. 3.51б, 3.53), а пик диаграммы, приведённой на рис. 3.53, приходится на июль, тогда как в августе наблюдается резкий спад.

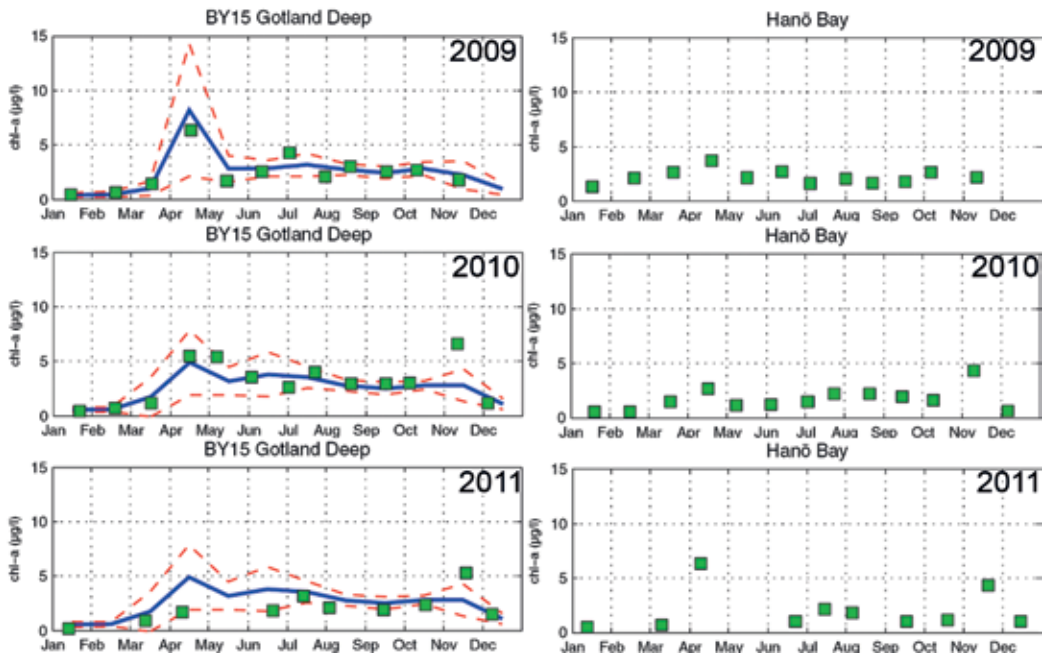


Рис. 3.54. Среднее содержание хлорофилла-а в слое от поверхности до глубины 20 м, измеренное *in-situ* (согласно работе [Johansen, Skjevik, 2009, 2010, 2011])

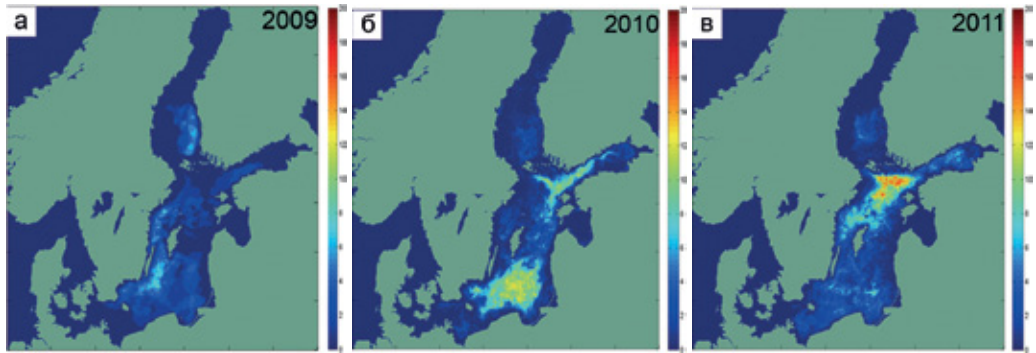


Рис. 3.55. Количество дней, когда наблюдалось цветение цианобактерий, сопровождающееся образованием поверхностных агломераций: *a* — 2009 г.; *б* — 2010 г.; *в* — 2011 г. (согласно работе [Hansson, Öberg, 2009, 2010, 2011])

В 2011 г. интенсивное весеннее цветение по-прежнему наблюдалось в южной Балтике, но практически отсутствовало в восточной части моря (см. рис. 3.54). Однако летнее цветение цианобактерий отличалось продолжительностью и распространялось на значительную часть акватории моря, включая Ботнический залив (рис. 3.55*в*). Соответственно в апреле 2011 г. на РЛИ было выявлено минимальное за три года количество проявлений долгоживущих корабельных следов (см. рис. 3.51*в*, 3.53), а приведённая на рис. 3.53 диаграмма характеризуется широким плавно спадающим максимумом.

Использование результатов радиолокационных наблюдений долгоживущих следов за кораблями может принести существенную пользу для решения задачи выявления районов и определения сроков интенсивного цветения фитопланктона. При этом видимая длина следов может служить опосредованным параметром, выявляющим размеры акватории, занятые цветением.

3.5. ВЫТОК ВОД ВИСЛЫ В ГДАНЬСКИЙ ЗАЛИВ

3.5.1. Гидрологические особенности Гданьского залива

Гданьский залив (The Gulf of Gdańsk) расположен в южной части Балтийского моря. Его северная граница — линия, простирающаяся между мысом Розеве (Cape Rozewie) и мысом Таран Самбийского полуострова (рис. 3.56). Средняя глубина залива составляет 70 м. Воды залива испытывают сильное влияние вытока реки Вислы. Висла (польск. Wisła), самая большая река в Польше и вторая по водности после Невы река бассейна Балтийского моря. Длина Вислы составляет 1047 км, площадь бассейна 198,5 тыс. км². Средний годовой расход воды в пределах устья составляет 1080 м³/с. Висла берет своё начало в Моравско-Силезских Beskidy, Западные Карпаты, и впадает в Гданьский залив в 15 км восточнее Гданьска. За 50 км от моря Висла распадается на отдельных рукава. Главными из них являются Ногат и Мёртвая Висла. Рукава Вислы образуют широкую дельту, именуемую Жулавы. В этом месте Висла оставляет

большое количество речных наносов и образует песчаные дюны, отделяющие Жулавы от Балтийского моря. Так как значительный участок Жулав расположен ниже уровня моря на 2 м, в этом месте пришлось соорудить сеть дамб и водоотводных каналов.

С конца XIX века Висла впадает в Гданьский залив через искусственный канал. Такое поступление речных вод без промежуточного эстуария способствует тому, что воды реки смешиваются с морскими водами прямо в заливе. В зависимости от ветра и течений две водных массы (речная и морская) могут интенсивно смешиваться, образуя динамичные гидрологические фронты, или разбиваться на отдельные рукава, и распространяться по заливу в виде разрозненных плюмов [Zajączkowski et al., 2010]. Попадая из реки в море, материковые воды образуют там прилежащие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной солёностью и температурой (повышенной или пониженной в зависимости от сезона), а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворенной органики. Такие структуры в современной литературе принято называть «плюмами» [Завьялов и др., 2014].

Характер течений в Гданьском заливе определяется в первую очередь ветровым полем и может изменяться во времени и в пространстве очень быстро. Направление течений и их интенсивность строго связаны с направлением ветра, его продолжительностью и скоростью, а также с очертанием береговой линии. В мелководной прибрежной зоне скорость вдольберегового течения, как правило, направленного на восток параллельного берегу, редко превосходит 50 см/с. Приповерхностное и придонное течения одинаково зависят от ветра, но их направления и скорости могут существенно отличаться [Kowalik, 1990].

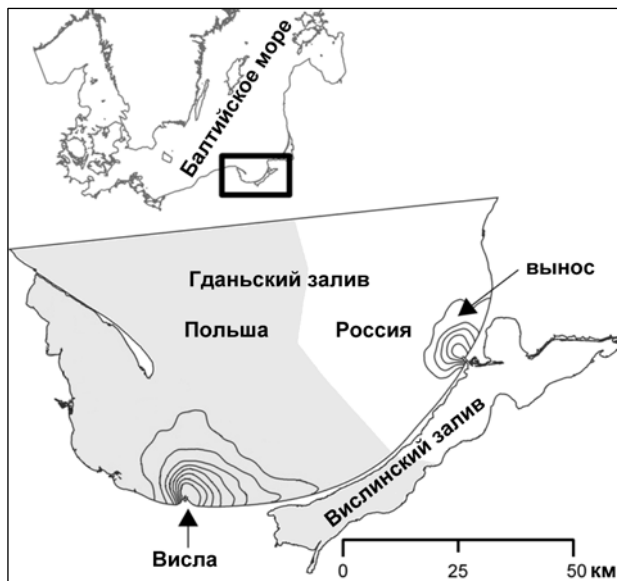


Рис. 3.56. Гданьский залив. Польская исключительная экономическая зона отмечена серым цветом. Изолинии показывают типичное расположение пресноводных плюмов [Urbanski et al., 2008]

Как показали натурные наблюдения, в случае западных, северных и восточных ветров распространение в заливе прибрежных вод сильно затруднено и они распространяются вдоль его побережья. В случае северо-восточного ветра вода перемещается на запад, в то время как в случае северо-западного ветра в восточном направлении. Ветер с юга и юго-запада способствует беспрепятственному распространению прибрежных вод далеко в залив. Также известно, что слабые ветры, скорость которых не превышает 2–3 м/с, облегчают распространение прибрежной воды, тогда как сильный ветер приводит к интенсивному перемешиванию вблизи устья реки.

Согласно статистике [The Gulf of Gdańsk, 1990], 50 % времени преобладает распространение речных вод на восток и на северо-восток; 25 % — распространение происходит на север и 16 % — речная вода распространяется в обе стороны от устья. Сезонные изменения речного стока имеют непосредственное влияние на сезонные изменения солёности, особенно в поверхностном слое прибрежных акваторий. В результате, в Гданьском заливе наблюдаются также и плотностные течения, вызванные неоднородностью плотности воды. Различие в плотности в Балтийском море происходит главным образом из-за обмена водной массы с Северным морем; однако в Гданьском заливе главная причина различий в плотности — выток реки Вислы. Плотностные течения слабее, чем течения, вызванные ветром, тем не менее, ими нельзя пренебрегать [Robakiewicz, 2009].

3.5.2. Спутниковые методы изучения речных плюмов

Повышение концентрации взвешенного вещества в шельфовой зоне определяется в первую очередь речным выносом, а именно стоком наносов в море. По оценке А. П. Лисицына [Лисицын, 1974] на долю стока приходится 73,1 % всего терригенного осадочного материала, участвующего в океанской седиментации. Остальные наносы в океан с суши поступают в виде стока растворенных веществ (12,7 %), эолового материала (6,4 %) и продуктов абразии (1,9 %). По пути следования с суши в море, часть речного аллювия отлагается в береговой зоне морей и океанов, где она образует прибрежно-морские отложения или береговые наносы. Сама береговая зона является пограничной полосой суши и моря, где происходит их взаимодействие. В целом, береговая зона является фильтром для материала, поступающего в океан с суши, который задерживает для его последующей переработки или для длительного хранения, и питает им остальные зоны океана [Лонгинов, 1973]. В этом процессе особая роль принадлежит речным устьям, где на барьере река-море происходит дифференциация и сортировка аллювиального материала на береговые (прибрежно-морские) и морские (глубоководные). Речной аллювий в устье доставляется в виде взвешенных и влекомых наносов, вид перемещения которых полностью зависит от крупности самих наносов [Джаошвили, 2002]. Влекомые — наносы, перемещающиеся в придонном слое потока; взвешенные — твёрдые частицы наноса находятся во взвешенном состоянии. В равнинных реках преобладают взвешенные наносы, в горных — влекомые. Принято следующее разделение на фракции взвесей и влекомых наносов:

- I — < 0,001 мм (илистые частицы);
- II — фракция 0,001–0,01 мм (пылеватые частицы);
- III — фракция >0,1 мм (песок).

В России мутность воды определяют фотометрическим путём сравнения проб исследуемой воды со стандартными суспензиями. Результат измерений выражают в г/м^3 (или в мг/дм^3) при использовании основной стандартной суспензии каолина или в ЕМ/дм^3 (единицы мутности на кубический дециметр) при использовании основной стандартной суспензии формазина. Последнюю единицу измерения называют также единицей мутности по формазину (ЕМФ) или в западной терминологии — FTU (Formazine Turbidity Unit), $1 \text{ FTU} = 1 \text{ ЕМФ} = 1 \text{ ЕМ/дм}^3$. В последнее время в качестве основной во всем мире утвердилась фотометрическая методика измерения мутности по формазину, что нашло своё отражение в стандарте ISO 7027 (Water quality — Determination of turbidity). Согласно этому стандарту, единицей измерения мутности является FNU (Formazine Nephelometric Unit). Агентство по охране окружающей среды США (U.S. EPA) и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) используют единицу измерения мутности NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Соотношение между основными единицами измерения мутности следующее: $1 \text{ FTU (ЕМФ)} = 1 \text{ FNU} = 1 \text{ NTU}$.

Следует отметить, что практически невозможно обеспечить сравнимость результатов, полученных в одних единицах, но на приборах различных конструкций, за исключением точек калибровки. Ещё сложнее сравнивать количественные значения, полученные дистанционными методами, с данными прямых измерений мутности или взвешенного вещества. Поэтому в дальнейшем мы будем оперировать некоторыми оценками, а не точными значениями.

Речные плюмы лучше всего проявляются на спутниковых изображениях, полученных в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного спектра. Для проведения мониторинга выносов рек нами использовались данные следующих сенсоров: TM Landsat-5, ETM+ Landsat-7, OLI/TIRS Landsat-8, MERIS Envisat, MODIS Terra/Aqua, MSI Sentinel-2A. В ближайшее время планируется использовать данные OLCI Sentinel-3. Строились цветосинтезированные изображения в «естественных цветах» (true color synthesized images), а также карты TSM (Total Suspended Matter), Chl-a (*Chlorophyll-a* Concentration) и SST (Sea Surface Temperature). Цветосинтезированные изображения видимого диапазона в «естественных цветах» лучше всего подходят для выявления акваторий с различными оптическими свойствами, которые в рассматриваемом случае определяются, прежде всего, различным содержанием взвешенного вещества.

На цветосинтезированных изображениях высокого пространственного разрешения хорошо выделяются три основных области плюма, которые различаются мутностью и, соответственно, цветностью. Первая — непосредственно примыкающая к устью реки — содержит основное количество речных наносов, состоящих в первую очередь из песка. Основная часть взвешенных наносов выпадает из речной струи в виде «песчаного дождя». Интенсивность и крупность этого «дождя» тем выше, чем ближе к устью происходит выпадение. На изображениях «в естественных цветах» первая область проявляется различными оттенками от серого и бежевого до тёмно-коричневого. Вторая область, окаймляющая первую, содержит мелкодисперсные алевритовые и пелитовые непляжеобразующие фракции. Данная область проявляется оттенками от жёлто-зелёного, до светло-зелёного. И, наконец, третья область может распространяться на большие расстояния и не иметь ярко выраженной границы. Это область плёночных загрязнений, связанных с речным стоком или содержащая частицы первой фракции (рис. 3.57а).

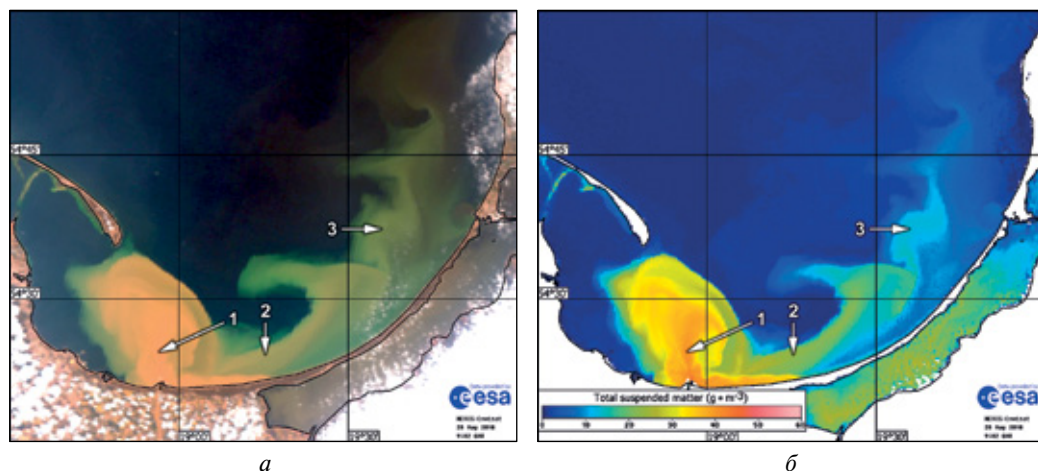


Рис. 3.57. Выделение трёх характерных областей вытока Вислы на изображении MERIS Envisat от 28 мая 2010 г.: *а* — цветосинтезированное изображение в «естественных цветах»; *б* — карта TSM. Стрелки указывают на области с различным содержанием взвешенного вещества. Описание областей дано в тексте

Выделение трёх основных областей на изображениях «в естественных цветах» является непростой задачей. Более объективную информацию можно получить используя карты TSM. Для выявления областей с различным содержанием взвешенного вещества нами используются карты TSM, построенные по данным приборов MODIS Aqua или MERIS Envisat. Для каждого конкретного случая, абсолютные значения, характеризующие каждую из трёх областей, будут разными. Для примера, представленного на рис. 3.57б, области 1 соответствуют значения $>32 \text{ г/м}^3$, области 2 — от 20 до 30 г/м^3 , а области 3 — от 5 до 18 г/м^3 . Как видно из сравнения рис. 3.57а и б, карты TSM дают более детальную информацию о структуре плюма.

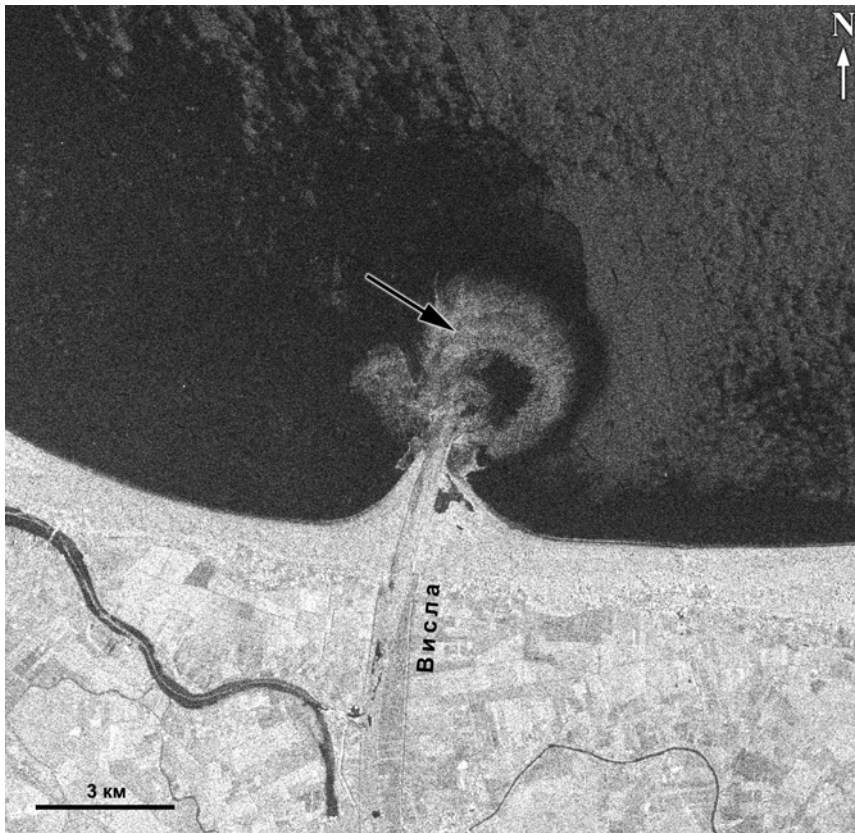
Характерно, что каждая река выносит в береговую зону присущие только её бассейну маркирующие породы, что облегчает установление границ распространения выносов каждой отдельной реки.

Для упрощения процедуры выделения каждой из трёх областей использовался инструмент проведения классификаций, включённый в геопортал “STS” (см. разд. 2.3), позволяющий проводить достаточно сложную обработку данных с целью разделения спутникового изображения на отдельные классы по определённым параметрам. Это может быть использовано для выделения различных особенностей изображения и построения тематических карт. Доступны методы с обучением и без обучения. Реализованные алгоритмы классификации составлены из модулей GRASS GIS [Neteler et al., 2012]. Для выделения областей с различной мутностью используется метод без обучения, который состоит из двух этапов: расчёт сигнатур и сама классификация методом максимального правдоподобия. Метод базируется на автоматической кластеризации объектов по признаку схожести спектральных характеристик. Все пиксели, имеющие сходные спектральные характеристики, объединяются в один класс. Число выделяемых классов задаётся пользователем. Для выделения трёх различных областей, различающихся по концентрациям взвешенного вещества, сначала

использовалась классификация по семи классам, которая, как правило, объединяла взмученную область в один класс, затем в рамках данного класса проводилась повторная классификация по трём классам. Полученный результат достаточно хорошо соответствует той картине, которую мы видим на рис. 3.57. Для каждого полученного класса оценивалась его площадь, а также суммарная площадь речного выноса.

Для выявления влияния ветра и осадков на распространение взвешенного вещества в прибрежной зоне в системе STS проводился совместный анализ данных спутниковой съёмки и метеоданных. Данные о ветре и об осадках поступают в информационную систему STS из архива реанализа NASA (NCEP Reanalysis). Для уточнения гидрометеорологической обстановки использовались также данные метеостанций прибрежных городов.

На спутниковых радиолокационных изображениях выток Вислы в зимний период проявляется либо за счёт формирования шуги на распреснённых водах (рис. 3.58), либо в виде яркой полосы, соответствующей гидрологическому фронту, либо в виде темной области пониженного радиолокационного сигнала, связанной с наличием на поверхности плёнки поверхностно-активных веществ, выносимых рекой.



Р и с. 3.58. Проявление вытока Вислы за счёт образования шуги на радиолокационном изображении SAR-C Sentinel-1A от 11 февраля 2016 г. Стрелка указывает на выток из Вислы

3.5.3. Мониторинг распространения вытока Вислы после аномального паводка

Выявление факторов, влияющих на распространение взвешенных веществ, связанных с выносом Вислы, было исследовано для случая одного из самых интенсивных и самых разрушительных наводнений за последние 100 лет на реке Висла. Наводнение, продлившееся в мае 2010 г. несколько недель, достигло устья реки в ночь с 25 на 26 мая. Максимальный речной расход воды составил $6838 \text{ м}^3/\text{с}$ [Zajaczkowski1, 2010]. Для сравнения средний расход воды около устья Вислы — $1080 \text{ м}^3/\text{с}$ [Pruszek et al., 2005]. Последствия такого мощного выноса ощущались в течение не менее двух недель. Удачно совпало, что 26 мая 2010 г. спутниковая съёмка Гданьского залива была выполнена сразу несколькими сенсорами: MERIS и ASAR Envisat, ETM+ Landsat-7 и MODIS Terra/Aqua. К тому же, что очень важно для интерпретации спутниковых данных, 26 мая 2010 г. проводились измерения с борта польского научно-исследовательского судна “Oceania”. Исследования были направлены на изучение современных процессов отложения осадков и отложений на подводной прodelьте Вислы. Эта работа в непосредственной близости от устья Вислы в день, когда наводнение достигло Гданьского залива, обеспечила беспрецедентный набор наблюдений за структурой плюма реки Вислы [Zajaczkowski, 2010]. Данные были получены *in-situ* 26 мая 2010 г. (табл. 3.2). Нами было проведено сравнение результатов, полученных при измерении *in-situ*, с данными спутниковых наблюдений [Lavrova et al., 2015].

Т а б л и ц а 3.2. Значения мутности, измеренные на стандартных горизонтах 26 мая 2010 г. [Zajaczkowski, 2010]

Станция (№)	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Мутность (FTU)	Глубина (м)
1	54.38738	18.93551	51.4	1
1	54.38738	18.93551	18.6	5
1	54.38738	18.93551	3.7	10
1	54.38738	18.93551	2.6	15
2	54.39286	18.98064	43.1	1
2	54.39286	18.98064	3.9	5
2	54.39286	18.98064	3.9	10
2	54.39286	18.98064	3.7	15
3	54.38189	19.01998	37.7	1
3	54.38189	19.01998	23.8	5
3	54.38189	19.01998	5.7	10
3	54.38189	19.01998	2.7	15
4	54.37634	19.0636	11.0	1
4	54.37634	19.0636	17.7	5
4	54.37634	19.0636	13.0	10
4	54.37634	19.0636	6.6	15

Станция (№)	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Мутность (FTU)	Глубина (м)
5	54.39456	19.06545	29.0	1
5	54.39456	19.06545	12.4	5
5	54.39456	19.06545	14.1	10
5	54.39456	19.06545	7.3	15
6	54.39654	19.02673	38.6	1
6	54.39654	19.02673	17.1	5
6	54.39654	19.02673	15.0	10
6	54.39654	19.02673	6.7	15
7	54.40513	18.98758	55.3	1
7	54.40513	18.98758	14.7	5
7	54.40513	18.98758	5.3	10
7	54.40513	18.98758	5.4	15
8	54.41625	18.94738	61.0	1
8	54.41625	18.94738	28.9	5
8	54.41625	18.94738	5.7	10
8	54.41625	18.94738	3.2	15

На рис. 3.59а представлен фрагмент изображения ETM+ Landsat-7 за 26 мая 2010 г., на котором отмечено положение станций, на которых брались пробы. Поскольку часть изображения закрыта облачностью, говорить о сравнении точных количественных характеристик, не приходится (рис. 3.59б). Более адекватные выводы можно сделать для 28 мая (рис. 3.59в, г). С точностью 10 % значения мутности на горизонте 1 м при измерениях *in-situ* и по данным MERIS Envisat совпадают, несмотря на то, что плюм под действием ветра изменил свою конфигурацию. Однако, поскольку ситуация вблизи устья, где собственно и проводились измерения с судна, существенно не изменилась, такое сравнение правомерно.

Было проведено исследование влияния ветра на распространение плюма. Выявлено, что области 1 и 2, т. е. те, где содержание взвеси высокое, в верхнем слое моря (а при такой мутности значения TSM, определённое по данным MERIS Envisat соответствуют значениям на горизонтах до 1 м) распространяются под действием ветра, а область 3 практически во всех рассматриваемых случаях распространялась параллельно берегу под действием циклонического прибрежного течения (рис. 3.60). Интересно отметить, что с 26 мая по 30 мая плюм увеличивался и достиг Хельской косы, с 31 мая по 3 июня облачность не позволила отслеживать ситуацию, но на изображениях от 4–6 июня взмученные воды наблюдались только у самого устья. Потом, после очередных ливневых дождей волна паводка способствовала образованию следующего плюма, количество взвешенного вещества в котором достигало 50 г/м^3 . Новый плюм также распространялся под влиянием практически ежедневно меняющего своё направление ветра [Lavrova et al., 2015].

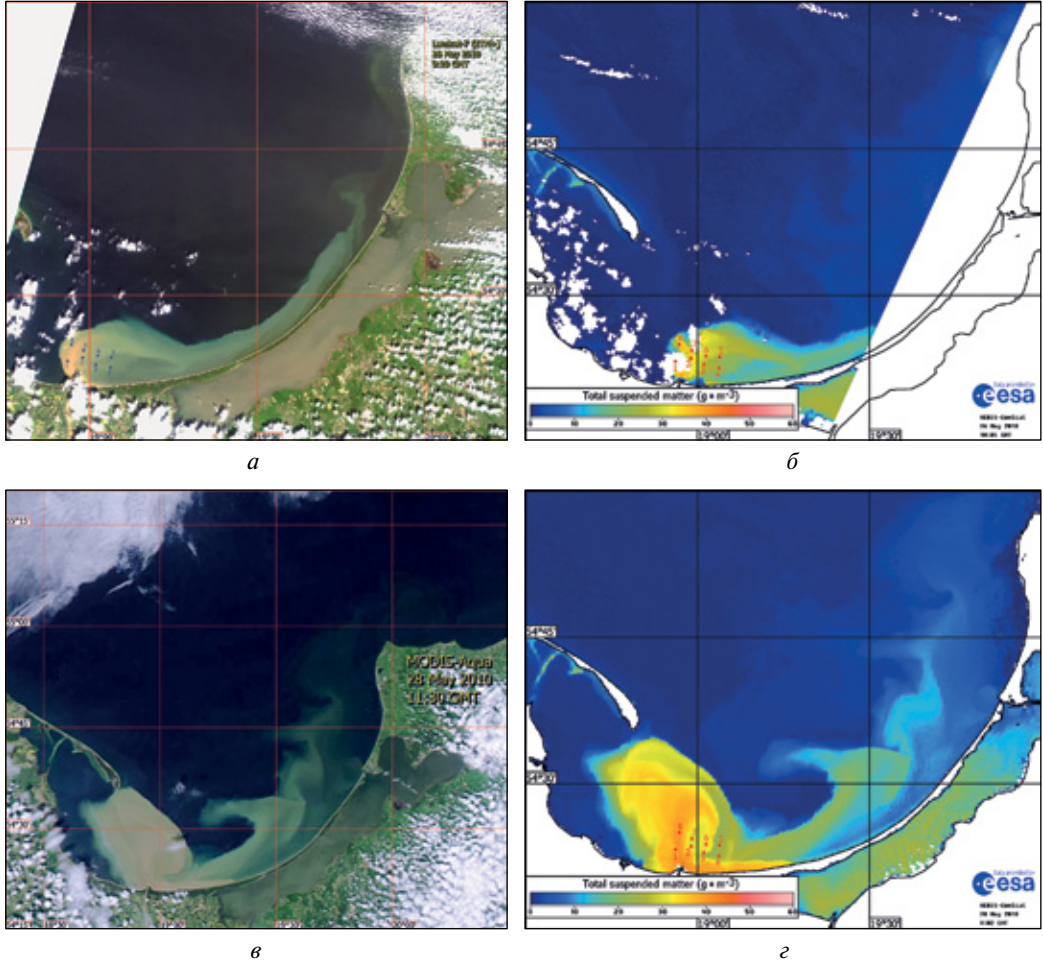
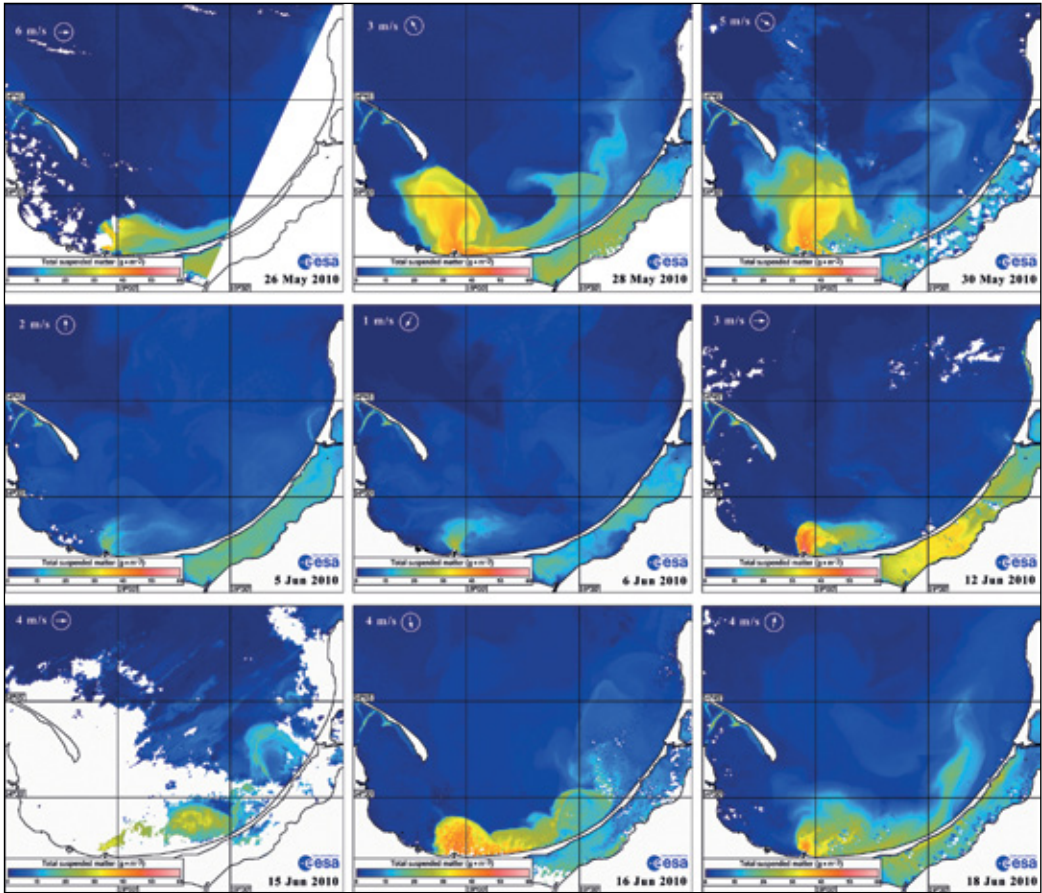


Рис. 3.59. Распространение плува реки Вислы в Гданьском заливе во время обширного наводнения 26–28 мая 2010 г.: *a* — ETM +Landsat-7 цветосинтезированное изображение в «естественных цветах» от 26 мая 2010 г., 9:29 GMT; *б* — карта концентрации взвешенного вещества (TSM) по данным MERIS Envisat от 26 мая 2010 г., 10:05 GMT; *в* — фрагмент цветосинтезированного изображения MODIS Aqua от 28 мая 2010 г., 11:30 GMT; *г* — карта концентрации взвешенного вещества (TSM) по данным MERIS Envisat от 28 мая 2010 г., 9:02 GMT. Точки с цифрами обозначают местоположение и номер станции, на которых отбирались пробы



Р и с. 3.60. Влияние ветра на распространение взвеси. Серия карт TSM, построенных на основе данных MERIS Envisat за период с 26 мая по 18 июня 2010 г. Стрелками отмечено направление ветра в районе устья Вислы

3.6. ВЫНОС ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗАЛИВА В ГДАНЬСКИЙ ЗАЛИВ

Как уже отмечалось выше (см. разд. 3.4), актуальной экологической проблемой Балтийского моря является эвтрофикация. Избыток питательных веществ приводит к резкому увеличению биомассы фитопланктона, отмечается массовое развитие цианобактерий. Акватория Гданьского бассейна, включая Калининградский (Вислинский) залив, относится к числу наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря [Kahru, Elmgren, 2014]. Каждый год наблюдается летнее «цветение» потенциально токсичных сине-зелёных водорослей, вызывающих резкое ухудшение свойств воды в Калининградском заливе, обусловленное обильным речным стоком и ограниченным обменом с Балтийским морем (см. разд. 3.1). Эвтрофикация вызывается быстрой урбанизацией, развитием промышленности и туризма в прибрежной зоне без достаточных инвестиций в развитие средств очистки сточных вод. Негативный вклад вносят ещё и загрязнения, связанные с сельским хозяйством [Finni et al., 2001]. Таксономический состав фитопланктона в заливе и его многолетняя динамика хорошо изучены. Три разновидности фитопланктона доминируют в Калининградском заливе: цианобактерии (*cyanobacteria*), зелёные морские водоросли (*green algae*) и диатомовые водоросли (*diatoms*) [Chubarenko, Margonski, 2008]. Цианобактерии составляют более 80 % от общей численности популяции. Воды залива через Балтийский пролив попадают в Гданьский залив (см. разд. 3.1) и при определённых гидрометеорологических условиях могут распространяться на большие расстояния, резко ухудшая экологическую обстановку в районе пляжей.

Хорошо известно, что цианобактерии отчётливо детектируются на изображениях сканеров цвета [Rud, Gade, 1999]. Сильное различие в оптических свойствах вод Балтийского моря, в частности Гданьского залива, и вод Калининградского залива в период интенсивного цветения фитопланктона позволяет проследить развитие и трансформацию факела выноса из залива на основе спутниковых данных видимого диапазона. Как показывают наши многолетние спутниковые наблюдения, выток вод из залива может формировать либо плюм, аналогичный речному, либо хорошо сформированную струю, которая может распространяться, как в циклоническом, так и антициклоническом направлении вдоль морского побережья.

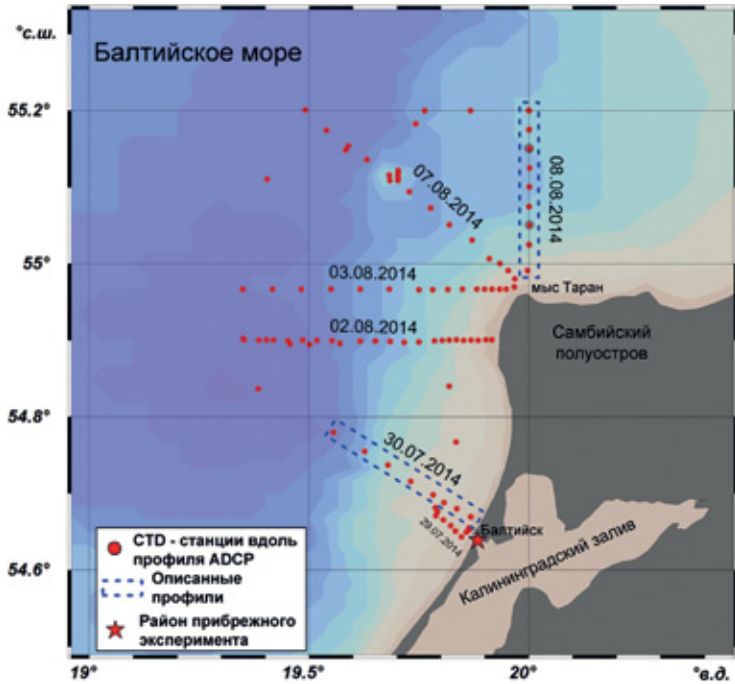
Циркуляция вод в юго-восточной части Балтийского моря целиком формируются полем ветра, в отличие, например, от Чёрного моря, где есть постоянное Основное черноморское течение (ОЧТ). Течение откликается на изменение ветра за инерционный период $T_{iner} = 1/f = 14$ ч (для данного района), где f — инерционная частота [Bowden, 1984]. За время $(2-3)T_{iner}$ практически полностью формируются квазигеострофические течения, которые при достаточно сильном ветре (~ 8 м/с) приобретают вид струй. При этом, поскольку западные ветра преобладают, даунвеллинговые струи также формируются чаще. В этом смысле даунвеллинговая струя есть приближенный аналог ОЧТ. Северо-восточные ветры, провоцирующие прибрежный апвеллинг, случаются значительно реже. Характер течений при апвеллинге схож с тем, что наблюдается при даунвеллинге, только направление течения меняется на противоположное. Как было отмечено в разд. 3.1, существование течения, направленного из Калининградского залива в море через Балтийский пролив, при котором и образуется выток из залива, также зависит от ветрового поля.

Как известно [Berdeal et al., 2002; Ou et al., 2009; Whitney, Garvine, 2005] на эволюцию речного плюма влияет большое количество факторов. К основным относятся: рельеф дна, сила Кориолиса, перепад плотности, расход реки, ветер, приливы и вдольбереговые течения. Для интересующего нас случая — распространение вод, выносимых из залива, — существенное влияние оказывают ветер, вдольбереговая циркуляция, а также вихревые процессы в Гданьском заливе [Гинзбург и др., 2015].

Юго-восточная часть Балтийского моря — это район образования интенсивных вихревых структур различных масштабов [Гинзбург и др., 2015; Демидов и др., 2011; Лаврова и др., 2011a; Gade et al., 2012; Karimova, Gade, 2016; Lavrova et al., 2008a, 2010]. Диаметры вихревых структур, проявляющихся на спутниковых изображениях, изменяются в широком диапазоне от 2 до 25 км, т.е. наблюдаются, как субмезомасштабные вихри (с диаметрами меньшими бароклинного радиуса деформации Россби, Rd), так и мезомасштабные, диаметры которых больше Rd . Для Балтийского моря Rd равняется 10 км, для Гданьского залива, глубины которого составляют 60–80 м, Rd составляет от 5 до 6 км, для мелководья радиус ещё меньше [Osinski et al., 2010]. Вихри, вихревые диполи и вихревые кластеры, как циклонической, так и антициклонической направленности вращения, регулярно наблюдаются как в самом Гданьском заливе, так и к северу и востоку от м. Таран. Основная причина их формирования, по видимому, определяется предшествующими ветровыми условиями [Гинзбург и др., 2015; Лаврова и др., 2011a; Gade et al., 2012; Karimova, Gade, 2016]. Эти вихревые структуры способствуют распространению и трансформации пресноводного плюма из Калининградского залива, который порой достигает м. Таран и распространяется на восток вдоль северного побережья Самбийского полуострова [Gurova, Chubarenko, 2012].

Данная акватория характеризуется сложным и крайне изменчивым гидродинамическим режимом [Добровольский, Залогин, 1982], который обусловлен сложной конфигурацией береговой линии, донным рельефом, ветровым режимом и особенностями циркуляции Балтики в целом [Гурова, Иванов, 2011; Демидов и др., 2011]. В целом, западное побережье Самбийского полуострова имеет достаточно ровный уклон дна, относительно крутой в районе Вислинской косы, где изобата 25 м обрывается на 2 км от уреза воды. Особенности гидрологических условий Балтийского моря обусловлены совокупностью режимобразующих факторов, к которым, в первую очередь, относятся: обмен теплом и пресной водой на поверхности моря, речной сток и водообмен с Северным морем.

Изучению влияния различных факторов на распространение вод Калининградского залива в Балтийском море были посвящены наши экспедиционные работы, которые проводились в июле-августе 2014 г. Экспедиционные работы осуществлялись в 20-мильной зоне юго-восточной части Балтийского моря на траверзе Балтийского пролива и в районе Самбийского полуострова (рис. 3.61). В ходе экспедиционных работ было проведено шесть буксировок акустического доплеровского профилографа течений TRDI Workhorse Sentinel 300 кГц (ADCP), жёстко установленного на исследовательском катамаране «Икар-2». По ходу буксировки ADCP также проводились STD-зондирования, отбор проб воды на гидрохимический анализ и непрерывный мониторинг метеорологических параметров [Лаврова и др., 2014a]. В дополнение к измерениям с исследовательского катамарана, выполнялись исследования гидрологической структуры вод с маломерного моторного судна в прибрежной зоне г. Балтийска и в Балтийском проливе.



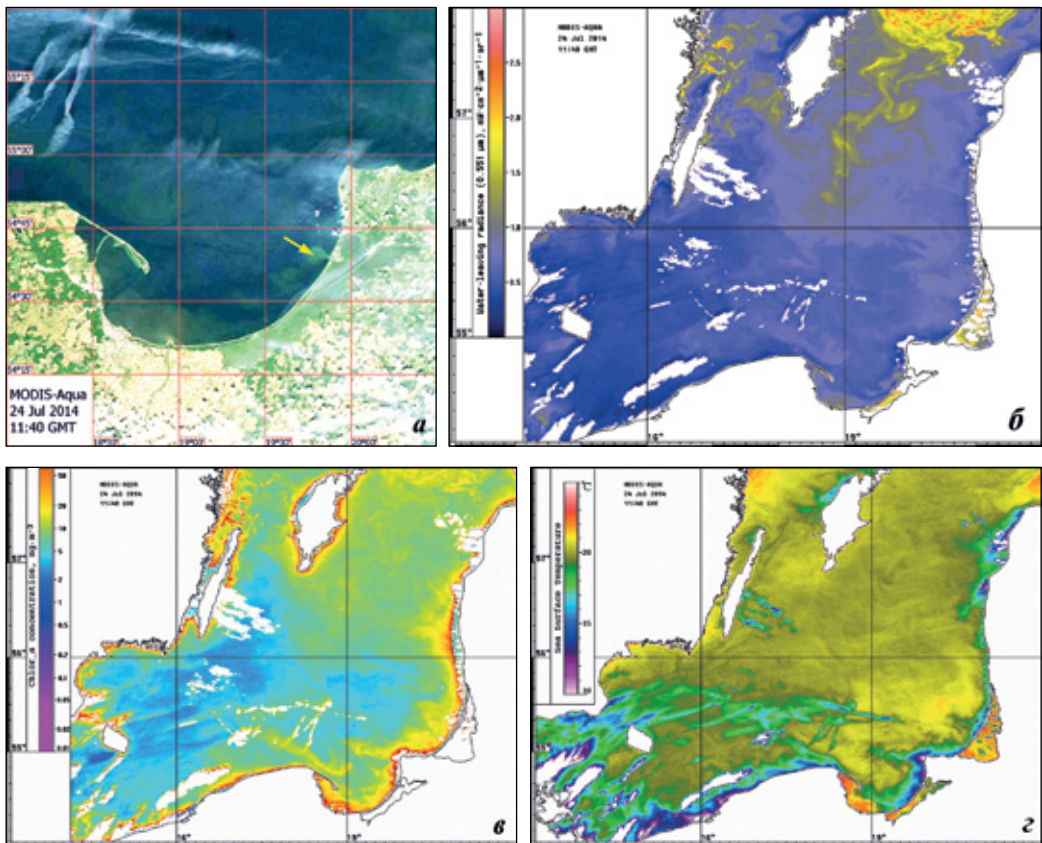
Р и с. 3.61. Карта района проведения подспутниковых измерений в июле-августе 2014 г.

Спутниковые наблюдения

Во второй половине июля 2014 г. под действием ветров восточных румбов сформировался факел выноса вод из Калининградского залива, который отчётливо проявился на спутниковых изображениях видимого диапазона. Более чем двухнедельная практически безоблачная погода в конце июля – начале августа 2014 г. позволила проследить на ежедневных изображениях MODIS Terra/ Aqua и данных сенсоров Landsat-7/8 распространение выноса мутных распреснённых вод Калининградского залива по акватории Юго-Восточной Балтики. Более 30 спутниковых изображений было получено и проанализировано за период проведения экспедиционных работ. Совместный анализ спутниковых данных и результатов натурных измерений позволил детально изучить влияние различных факторов на эволюцию плюма [Лаврова и др., 2014а].

На основе данных сенсора MODIS строились: цветосинтезированные композиты «в естественных цветах» (“True color”), карты восходящего излучения воды (Water Leaving Radiance) на волне 0,551 мкм, карты концентрации хлорофилла-а (*Chlorophyll-a* Concentration) и карты температуры поверхности моря (Sea Surface Temperature). Пример проявления выноса на данных картах представлен на рис. 3.62. Наиболее отчётливо вынос можно выделить на True color изображениях в виде светло-зелёной струи (рис. 3.62а) и на картах восходящего излучения воды (рис. 3.62б).

Поскольку повышенная концентрация *хлорофилла-а* наблюдается в летний период практически вдоль всей береговой черты (рис. 3.62в), однозначно идентифицировать факел выноса не представляется возможным. На картах температуры поверхности моря, построенных по данным MODIS (рис. 3.62г), струя выноса практически не проявлялась, поскольку в период наблюдений, в третьей декаде июля – начале августа 2014 г. в прибрежной зоне на юг от пролива вдоль Балтийской косы и на север вдоль Самбийского полуострова существовал сильный апвеллинг, температура воды опустилась до 14–16°, при температуре воздуха близкой к 30 °С. Тёплые воды залива, попадая в открытое море, быстро перемешивались с холодными прибрежными водами, и на ИК-изображениях, имеющих пространственное разрешение 500 м, температурные контрасты, связанные с выносом более тёплых вод, не выявляются.



Р и с. 3.62. Пример проявления выноса вод из Калининградского залива на различных продуктах, построенных на основе данных MODIS Aqua от 24 июля 2014 г.: *а* — цветосинтезированное изображение (True color), стрелка указывает на вынос; *б* — карта восходящего излучения воды (Water Leaving Radiance) на волне 0,551 мкм; *в* — карта концентрации *хлорофилла-а* (Chlorophyll-*a* Concentration); *г* — карта температуры поверхности моря (Sea Surface Temperature)

На изображениях, полученных с помощью установленных на спутниках Landsat-7 и Landsat-8 приборов, имеющих существенно более высокое пространственное разрешение, структура выноса хорошо различается не только в данных видимого диапазона (разрешение 30 м), но и в данных ИК-диапазона (рис. 3.63). На карте температуры поверхности моря, построенной по данным сенсора TIRS Landsat-8 от 23.07.2014 г., имеющего пространственное разрешение 100 м, хорошо видны температурные контрасты: температура поверхности воды в заливе составляла 22 °С, вдольбереговой апвеллинг охладил воду Балтийского моря до 14 °С, а температура вынесенной из залива воды, при смешивании с прибрежными водами моря, изменялась от 20 °С на выходе из пролива до 18 °С на расстоянии 2 км.

Однако для ежедневного мониторинга распространения выноса одних изображений Landsat не достаточно, несмотря на всю их информативность, так как съёмка производится над конкретным районом только один раз в 8 дней. Основное преимущество данных MODIS заключалось в возможности регулярного, практически ежедневного их получения дважды в сутки (со спутников Terra и Aqua). Если за период времени между пролётами этих двух спутников (максимум 2 ч) серьёзных изменений формы выноса не наблюдалось, то за сутки картина иногда менялась кардинально.

Цветосинтезированные True color изображения, полученные с 22.07.2014 по 09.08.2014 г. с помощью MODIS Aqua и OLI Landsat-8, представлены на рис. 3.64, 3.66 и 3.68. Подспутниковые измерения начали проводиться только 29 июля (табл. 3.3). Но для исследования влияния различных факторов на распространение выноса целесообразно было проанализировать всю серию из 12 изображений, которые позволили проследить все стадии «развития» выноса от его формирования 22 июля, максимального распространения по всему Гданьскому заливу к 30 июля и смещения на северо-восток вдоль Самбийского полуострова с образованием вихревых структур в районе м. Таран 9 августа 2014 г.

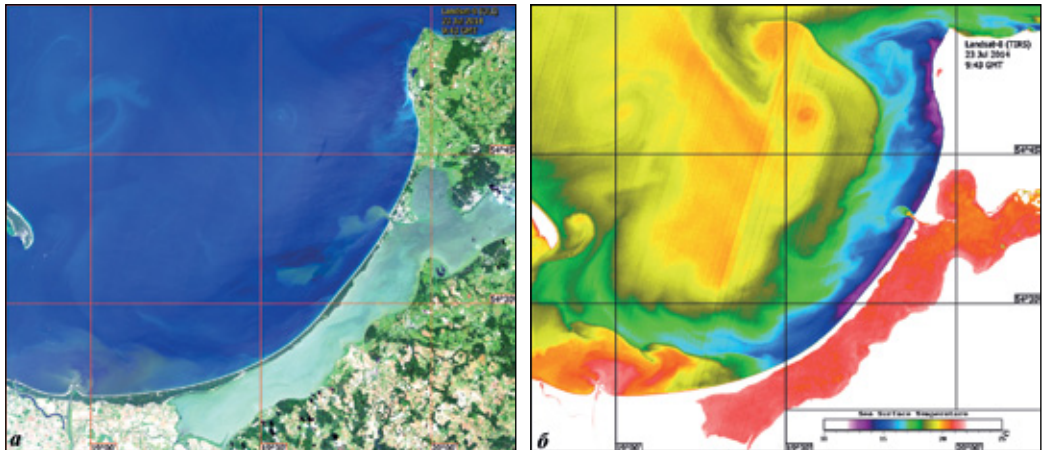


Рис. 3.63. Проявление выноса вод из Калининградского залива на изображениях Landsat-8 за 23 июля 2014 г.: *a* — цветосинтезированное изображение, полученное сенсором OLI Landsat-8; *б* — ИК-изображение, полученное сенсором TIRS Landsat-8

Т а б л и ц а 3.3. Сводная таблица параметров спутниковых данных и подспутниковых измерений

Дата	Время (UTC)	Спутниковая информация	Подспутниковые натурные измерения*
07.07.14	09:43	OLI/TIRS Landsat-8	–
	11:00	MODIS Aqua	
21.07.14	09:20	MODIS Terra	–
	11:10	MODIS Aqua	
22.07.14	10:05	MODIS Terra	–
	11:55	MODIS Aqua	
23.07.14	09:43	OLI/TIRS Landsat-8	–
	10:45	MODIS Terra	
	11:00	MODIS Aqua	
24.07.14	09:35	ETM+ Landsat-7	–
	09:50	MODIS Terra	
	11:40	MODIS Aqua	
25.07.14	10:35	MODIS Terra	–
	11:55	MODIS Aqua	
28.07.14	11:15	MODIS Aqua	–
29.07.14	10:10	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и вдольбереговые
	11:55	MODIS Aqua	
30.07.14	10:55	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и вдольбереговые
	11:05	MODIS Aqua	
31.07.14		100%-я облачность	Измерения в заливе
01.08.14	09:37	OLI/TIRS Landsat-8	Измерения в заливе
	02.08.14	09:45	
02.08.14	11:35	MODIS Aqua	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и вдольбереговые
	03.08.14	10:30	
03.08.14	10:40	MODIS Aqua	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и вдольбереговые
	04.08.14	16:10	
05.08.14		100%-я облачность	Вдольбереговые измерения
06.08.14		100%-я облачность	Измерения в заливе
07.08.14	10:05	MODIS Terra	Измерения в открытой акватории Балтийского моря и в заливе
	11:55	MODIS Aqua	
08.08.14		100%-я облачность	Измерения в открытой акватории Балтийского моря
09.08.14	09:35	ETM+ Landsat-7	–
	11:40	MODIS Aqua	

* Измерения в открытой акватории Балтийского моря проводились с катамарана «Икар-2», вдольбереговые измерения и измерения в заливе проводились с моторной лодки.

Влияние ветровых условий на распространение выноса

Для исследования влияния ветровых условий на распространение выноса были проанализированы совместно спутниковые изображения и карты поля ветра, которые предоставляет Гидрометцентр России (<http://hmc.meteorf.ru/sea/balt/gfs/menu.php>). Карты строились по данным прогноза, выпускаемого метеоцентром NCEP/NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>) с пространственным разрешением 2° с временным интервалом 4 ч.

В период с 22 по 29 июля 2014 г. преобладали ветра восточного (северо-восточного, юго-восточного) направления (рис. 3.64, и частично 3.66), что способствовало не только усилению выноса из пролива, но и образованию течений в условиях апвеллинга. Вдольбереговая струя течений была направлена в антициклоническом направлении. В том же направлении, на юго-запад, распространялся и вынос. На рис. 3.65 схематично представлены контуры выноса за период 22–25 июля, диагностированные по проявлениям на спутниковых изображениях.

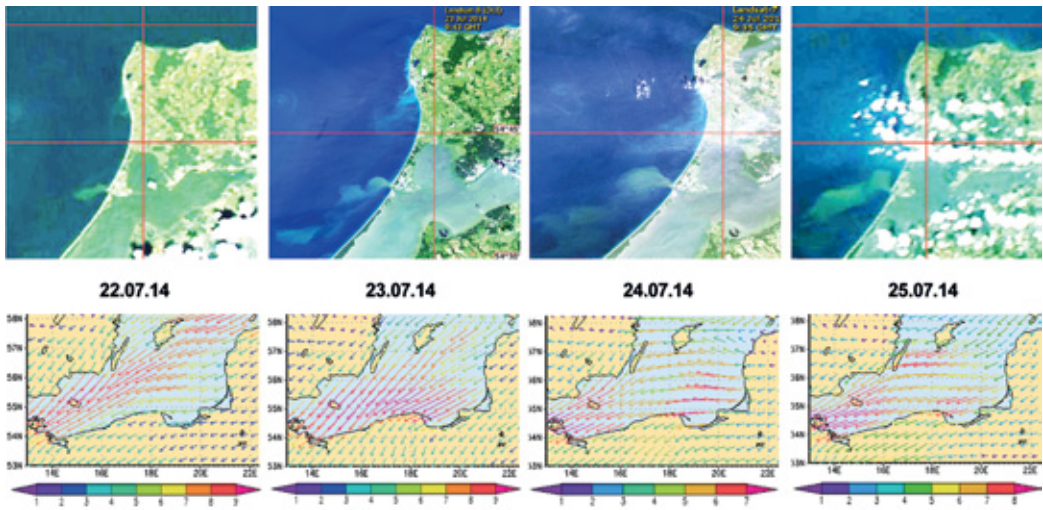
Начиная с 28 июля, ветер ослабевает, направление его меняется сначала на южное, потом на западное (01.08.2014 г.). Прибрежное течение, вызванное этим ветром, формировалось в условиях сложного, затухающего апвеллинга, предшествующего даунвеллинговому режиму. Струя выноса в этот период распространяется по всему Гданьскому заливу и достигает наибольшей протяженности к 30 июля (рис. 3.66, 3.67). 29–30 июля дальний конец струи начинает разворачиваться на север. Такой резкий поворот струи на север мог быть вызван двумя причинами: сменой направления ветра и/или взаимодействием струи с речным плюмом Вислы, который отчётливо проявляется на изображениях MODIS Aqua, полученных в период 28–30 июля 2014 г. В дальнейшем, до конца наблюдений, ветер оставался слабым, постоянно меняющим своё направление.

Наличие южной и западной компоненты направления ветра приводят к тому, что вынос из залива ослабевает, и он начинает распространяться вдоль Самбийского полуострова на север в условиях даунвеллингового режима, с образованием циклонического завихрения у мыса Таран (рис. 3.68, 3.69).

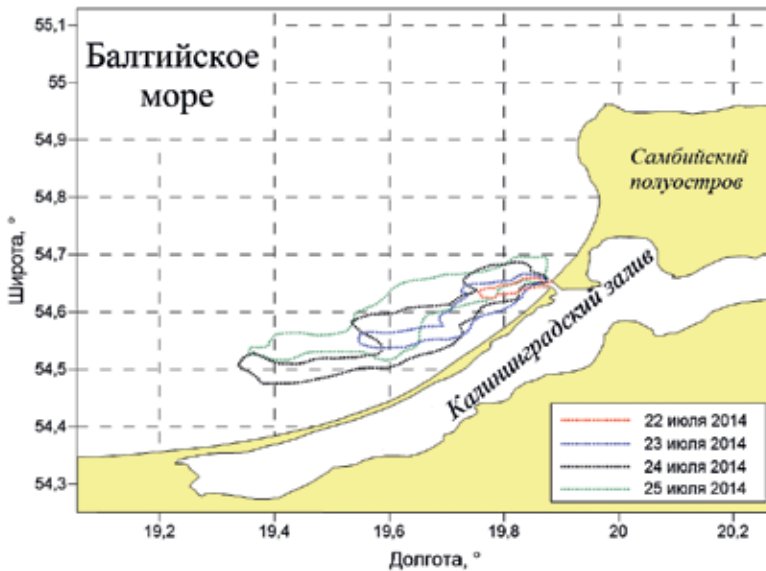
Таким образом, совместный анализ спутниковых данных и ветровых условий в районе спутниковых наблюдений показал, что основное направление распространения струи выноса мутных вод из Калининградского залива, выявленное по спутниковым данным, совпадает с направлением течений, сформировавшихся под действием ветра [Lavrova et al., 2016a].

Сравнение результатов подспутниковых измерений со спутниковыми наблюдениями

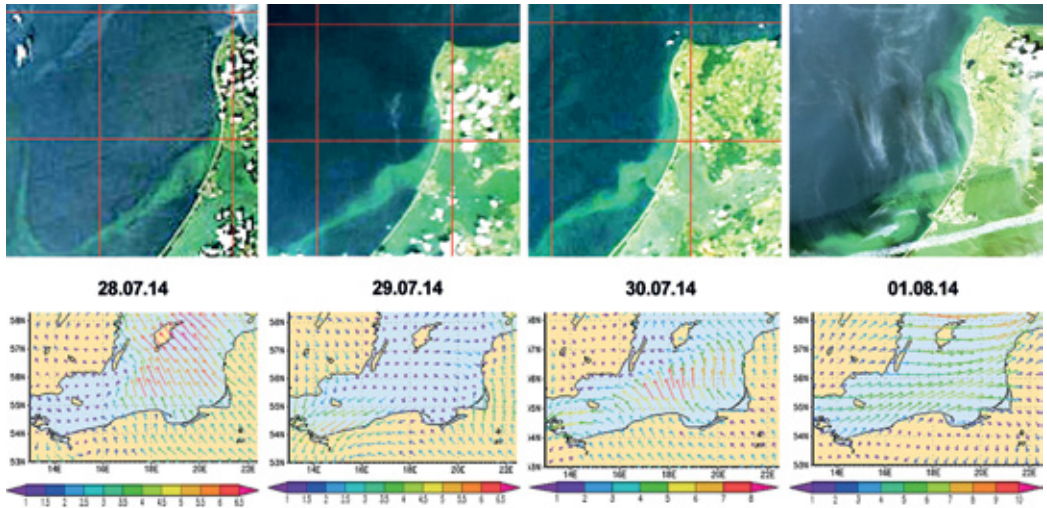
Возникает вопрос, насколько адекватно восстанавливаются параметры выноса по спутниковым данным и какова его трёхмерная структура. Для нахождения ответа на этот вопрос было проведено сравнение результатов синхронных подспутниковых измерений параметров течений и гидрологической структуры вод в районе выноса и спутниковых наблюдений. Подробно остановимся на результатах эксперимента по верификации спутниковой информации в прибрежной зоне Балтийского моря, проведённого 30 июля 2014 г.



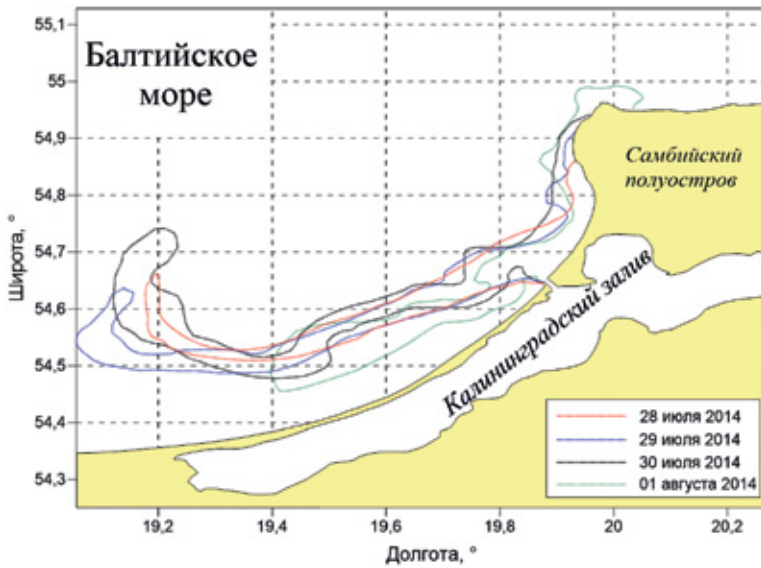
Р и с. 3.64. Фрагменты спутниковых изображений за период 22–25 июля 2014 г., содержащих проявления выноса (верхний ряд). Векторы скорости ветра (м/с) на высоте 10 м за тот же период (нижний ряд). Величина скорости характеризуется цветом и длиной стрелок. Карта построена в Гидрометцентре России по данным прогноза, выпускаемого метеоцентром NCEP/NOAA (©ГУ «Гидрометцентр России» Росгидромета, ©NCEP/NOAA)



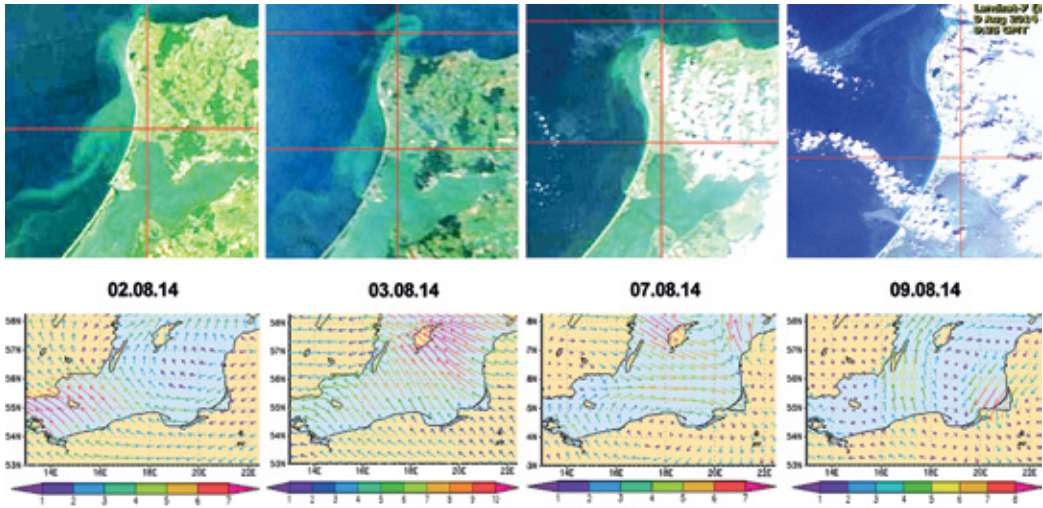
Р и с. 3.65. Контуры выноса, восстановленные по спутниковым данным за 22–25 июля 2014 г.



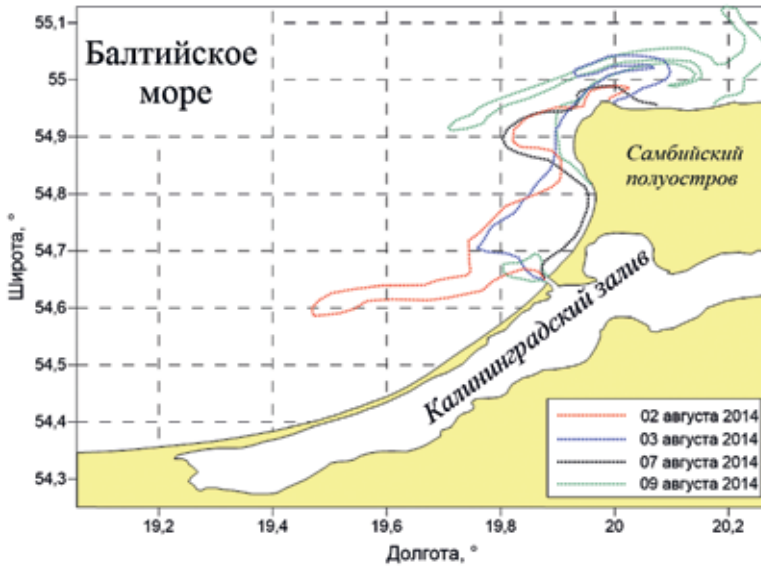
Р и с. 3.66. Фрагменты спутниковых изображений, полученных 28 июля – 1 августа 2014 г., содержащих проявления выноса (верхний ряд). Поле ветра на высоте 10 м за тот же период (нижний ряд) (©ГУ «Гидрометцентр России» Росгидромета, ©NCEP/NOAA)



Р и с. 3.67. Контуры выноса, восстановленные по спутниковым данным за 28 июля – 1 августа 2014 г.



Р и с. 3.68. Фрагменты спутниковых изображений, полученных 2–9 августа 2014 г., содержащих проявления выноса (верхний ряд). Поле ветра на высоте 10 м за тот же период (нижний ряд) (©ГУ «Гидрометцентр России» Росгидромета, ©NCEP/NOAA)

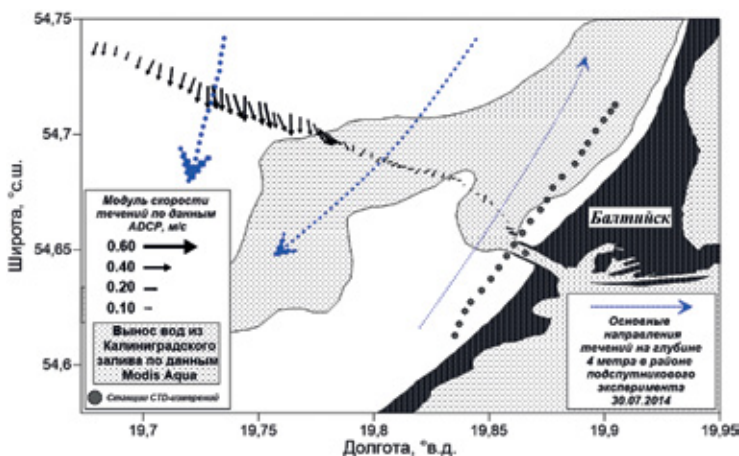


Р и с. 3.69. Контуры выноса, восстановленные по спутниковым данным за 2–9 августа 2014 г.

Ветровой режим над исследуемой акваторией имел нестационарный характер с незначительными величинами скорости ветра. В предыдущие два дня направление ветра существенно менялось, не имея определённого выраженного характера. Скорость ветра не превышала 3 м/с за исключением 03:00 28 августа 2014 г. Здесь и далее указано местное время, которое отличается на 3 ч в большую сторону от Всемирного координированного времени (UTC). В день проведения эксперимента, начиная с 09:00, наблюдался устойчивый сгонный ветер с усилением до 5 м/с, с последующим ослаблением к вечеру. Осреднённые за 3 ч данные по скорости и направлению ветра на высоте 10 м в районе эксперимента были получены с метеостанции г. Балтийска через интернет-ресурс (<http://rp5.ru>).

На рис. 3.70 представлена общая схема проведения подспутникового эксперимента 30 июля 2014 г.; результаты измерений поверхностных течений при помощи ADCP и ветровые условия в прибрежной акватории г. Балтийска. Стрелками обозначены векторы течений по ходу буксировки ADCP. Точками показаны станции STD-измерений в прибрежной зоне. Каждая точка соответствует трём станциям. Синими стрелками показаны основные направления поверхностных течений, полученных по данным ADCP.

Буксировка акустического профилографа стартовала в 09:00 с выходом из Балтийского пролива в акваторию Балтийского моря. Течение на глубине 4 м на выходе из пролива имело слабую магнитуду, в среднем составляя 5–7 см/с с генеральным направлением на северо-восток. Контур выноса, определённый по данным MODIS Aqua, распространялся также на северо-восток вдоль побережья. При удалении от берега на 4,5 км поле поверхностных течений поменяло направление на юго-западное, при этом наблюдалось постепенное увеличение скорости течения до 10–15 см/с. Область, занятая выносом вод из Калининградского залива, также смещалась на юго-запад. На расстоянии 7–8 км от берега скорость течения усилились до 20–30 см/с, а основное направление течения сменилось на юго-юго-западное, что вызвало прижимание области выноса к побережью.



Р и с. 3.70. Схема проведения подспутникового эксперимента 30.07.2014 г. и результаты измерений с помощью ADCP

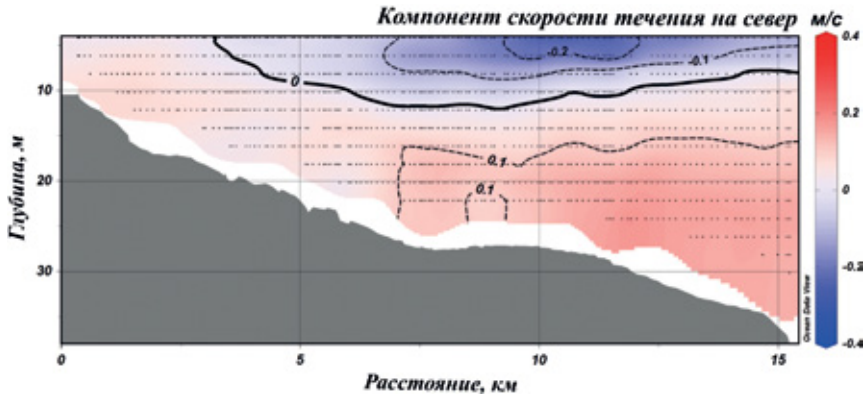


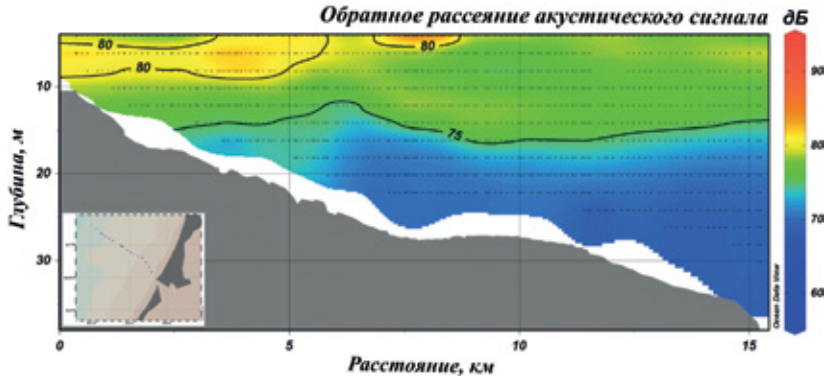
Рис. 3.71. Северная составляющая течения на разрезе буксировки ADCP. Измерения выполнены 30.07.2014 г.

Структура течений в районе подспутникового эксперимента была неоднородна как по горизонтали, так и по вертикали (рис. 3.71). Поверхностные течения, как было показано выше, поменяли генеральное направление на расстоянии 4,5 км от берега. По глубине область смены направлений течений простиралась до 10 м. Глубже 10 м подобной смены направления течений не наблюдалось, вся толща вод двигалась со скоростями до 10 см/с в северо-восточном направлении.

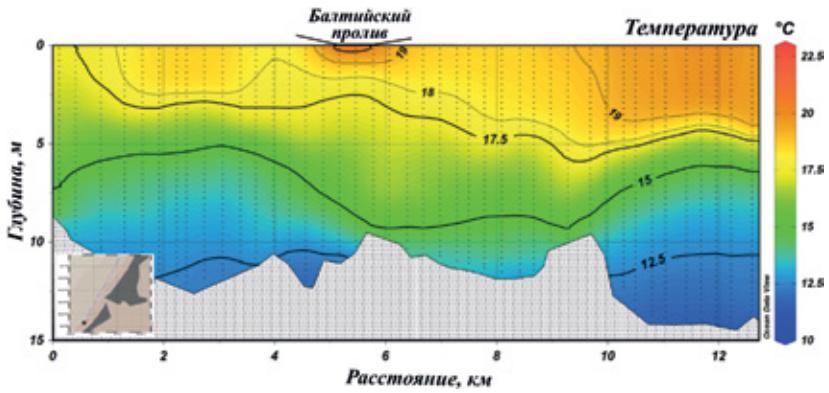
Одной из важнейших задач исследования была верификация данных спутникового зондирования, по которым определялась область выноса вод. Как было отмечено выше, зона выноса на спутниковых изображениях видимого диапазона идентифицировалась как область с более мутными водами. Акустический профилограф течений по данным рассеяния акустического сигнала позволяет качественно определять области повышенной концентрации взвешенных частиц в воде, в нашем случае — идентифицировать наличие выноса мутных вод из Калининградского залива. На рис. 3.72 представлено распределение величины рассеяния акустического сигнала на разрезе буксировки ADCP.

Характерно, что нулевая точка смены поля течений попала в область пониженного рассеяния, где отсутствовала вода из залива. Спутниковые изображения в момент эксперимента подтверждают отсутствие воды из залива в данной области. На расстоянии 4–6 км от берега область повышенного рассеяния вновь проявляется, что согласуется с данными спутниковых изображений. На расстоянии 8 км значения акустического рассеяния понижаются до соответствующих для «чистой» воды акватории Балтийского моря.

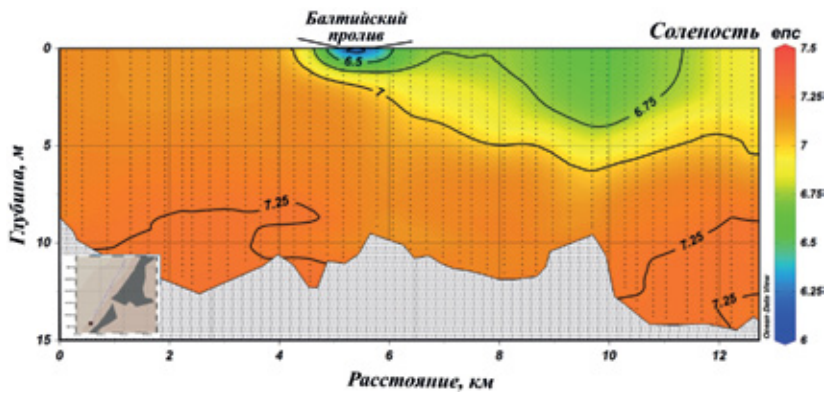
Для определения характера распространения вод из Калининградского залива был выполнен STD-разрез вдоль берега (42 станции), пересекающий область выноса вод. Для определения термохалинных параметров вод пролива через него был выполнен разрез из 8 станций. Распределения поля температуры и солёности морских вод вдоль побережья представлены на рис. 3.73, 3.74. На рисунках разрезы ориентированы в направлении юго-запад — северо-восток. Область выноса на поверхности на расстоянии ~300 м от берега характеризуется водой с солёностью 6,25 епс (единица практической солёности) и температурой 20,5 °С.



Р и с. 3.72. Распределение обратного акустического рассеяния на разрезе буксировки ADCP. Измерения выполнены 30.07.2014 г.



Р и с. 3.73. Распределение температуры воды по CTD-разрезу вдоль берега. Измерения выполнены 30.07.2014 г.

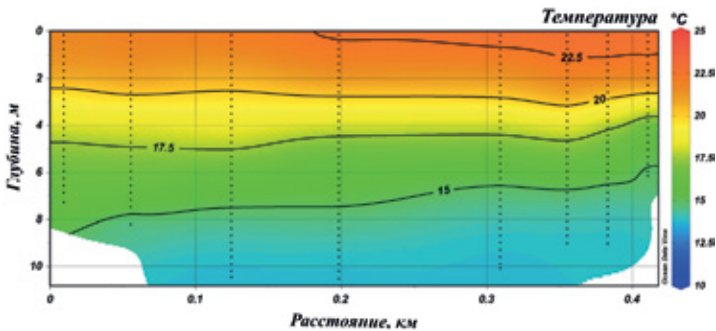


Р и с. 3.74. Распределение солёности воды по CTD-разрезу вдоль берега. Измерения выполнены 30.07.2014 г.

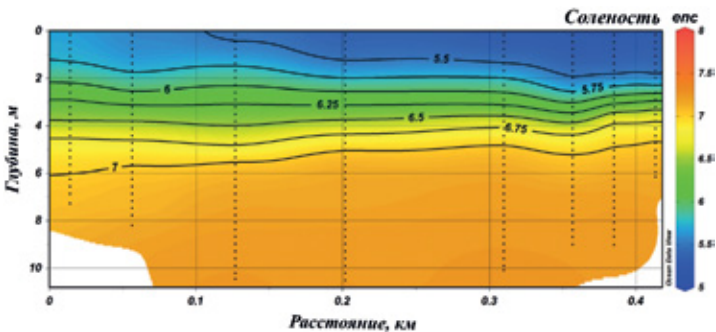
При движении на юго-запад термохалинная структура приобретает ярко выраженный морской характер с температурой не более 18°C на поверхности и солёностью 7,2 епс, что соответствует температуре и солёности вод открытой акватории Балтийского моря в исследуемом регионе. Примечательно, что поле солёности практически однородно по вертикали и горизонтали юго-западнее Балтийского пролива. Однако при рассмотрении северо-восточной области разреза наблюдается область пониженной солёности и повышенной температуры до глубины ~ 5 м. Данная область находится под влиянием выноса вод из Калининградского залива, согласно рис. 3.70. Горизонтальный градиент солёности на расстоянии 6 км от области выноса на восток составляет 0,1 епс на 1 км.

Характерно, что область выноса вод отсутствует на расстоянии 7–9 км вдоль STD-разреза, согласно рис. 3.70, что нашло отражение и в термохалинной структуре. Здесь область пониженной солёности проявляется всего до глубины 1–2 м. В то же время на удалении 10–12 км вдоль разреза проявляется область вод с температурой $>19^{\circ}\text{C}$ и солёностью $<6,75$ епс, которая распространяется до глубины 4–5 м.

В самом Балтийском проливе были получены вертикальные распределения температуры и солёности вод, которые представлены на рис. 3.75, 3.76. Разрезы ориентированы с запада на восток.



Р и с. 3.75. Распределение температуры воды по STD-разрезу в Балтийском канале. Измерения выполнены 30.07.2014 г.



Р и с. 3.76. Распределение солёности вод по STD-разрезу в Балтийском канале. Измерения выполнены 30.07.2014 г.

Измеренная температура вод в проливе была существенно выше температуры вод морской акватории на $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вертикальное распределение температуры имело квазилинейный характер на протяжении всего разреза, уменьшаясь с глубиной от 23 до $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Единственной отличительной чертой являлось наличие горизонтального градиента в поле температуры от западного берега к восточному. Это позволяет сделать вывод, что вынос вод из залива осуществляется неравномерно с усилением в восточной части.

Поле солёности также имеет достаточно однородный характер по вертикали, однако примечательно, что на дне пролива наблюдается вода со значениями солёности, характерными для морских вод. Данный факт может свидетельствовать о двухслойном характере течений в проливе: не только о выносе вод из залива, но, либо о переменном движении воды в проливе, либо о придонном затоке вод из моря в Калининградский залив. Поле солёности также имело горизонтальный градиент на поверхности. Уменьшение солёности на протяжении всего пролива составляло $0,3$ епс.

Влияние вихревого диполя на трансформацию плюма

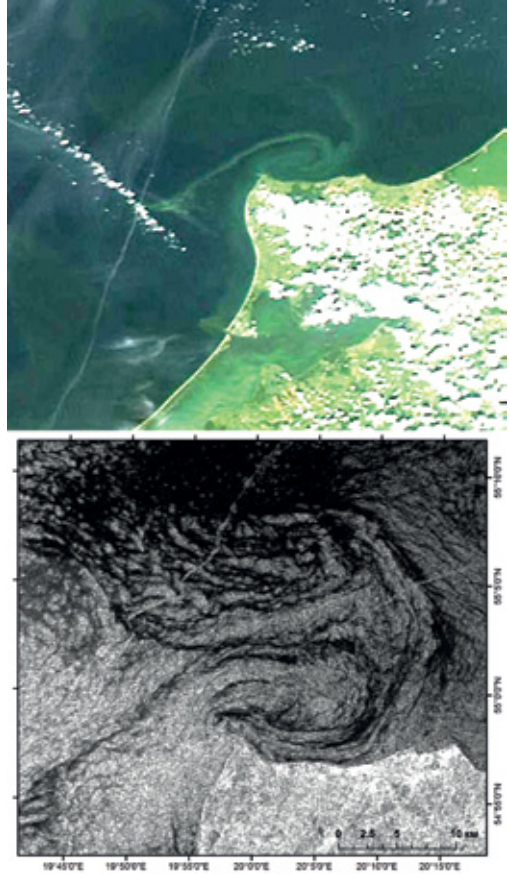
В период проведения подспутниковых измерений спутниковые изображения MODIS Aqua, ETM+Landsat-7 и Radarsat-2, полученные 7–9 августа 2014 г., выявили наличие вихревых структур в районе м. Таран (рис. 3.77). Проведённые натурные измерения позволили определить их основные характеристики [Lavrova et al., 2016a].

На рис. 3.78 представлена схема выполненного разреза с помощью ADCP от побережья Самбийского полуострова в акваторию Балтийского моря 7–8 августа 2014 г. Разрез наложен на радиолокационное изображение Radarsat-2 за 9.08.2014 г. Голубыми точками нанесён контур взмученных вод, определённый по данным ETM+Landsat-7 от 8.08.2014 г. На радиолокационном изображении в поле рассеяния сигнала отчётливо проявляется диполь с двумя вращающимися в противоположные стороны вихревыми структурами по периферии. Заметим, что контур мутных вод практически идеально повторяет геометрию вихревой структуры, что дополнительно подтверждает существование вихря. Диаметр диполя составил ~ 22 км, а радиус вращающихся структур по периферии ~ 8 км.

Ветровая ситуация во время проведения этого эксперимента была неустойчивой: западный ветер за два дня сменился на северный, а затем на северо-восточный, сохраняя антициклоническую завихренность. Гидродинамические условия сделали возможным образование вихревого диполя, ось которого располагалась параллельно северному побережью Самбийского полуострова [Гинзбург и др., 2015]. Данный диполь отчётливо проявился на РЛИ Radarsat-2 от 9 августа 2014 г. за счёт сликовых полюс, вытянувшихся вдоль линий тока поверхностных течений (см. рис. 3.77).

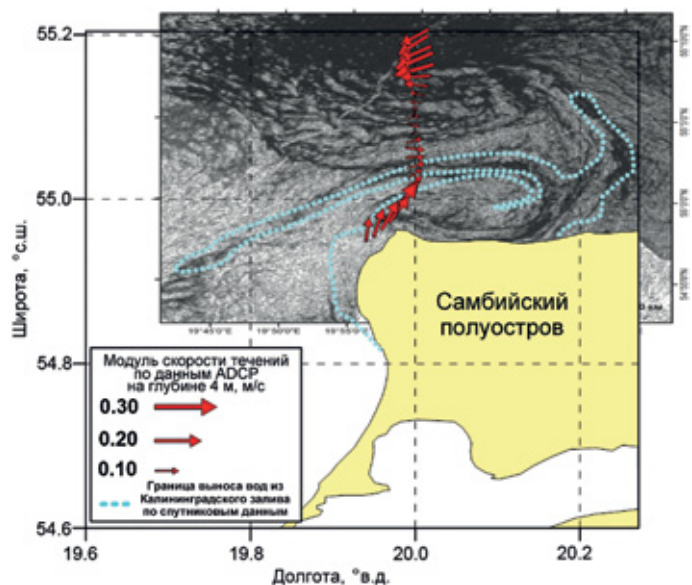
Результаты выполненной съёмки с помощью ADCP показали, что поле течения сильно неоднородно, наличие смены течений наблюдалось, как в среднем по толще воды, так и в поверхностном слое. В северной части разреза скорость поверхностных течений составляла в среднем $\sim 15\text{--}20$ см/с, и преимущественно течений западное направление. По мере продвижения к м. Таран скорость течений уменьшалась до величины 5 см/с, и течение перестало иметь ярко выраженное направление.

Рис. 3.77. Проявление вихревого диполя вблизи м. Таран на спутниковых изображениях от 9.08.2014 г.: вверху — MODIS Aqua; внизу — Radarsat-2 [Гинзбург и др., 2015]

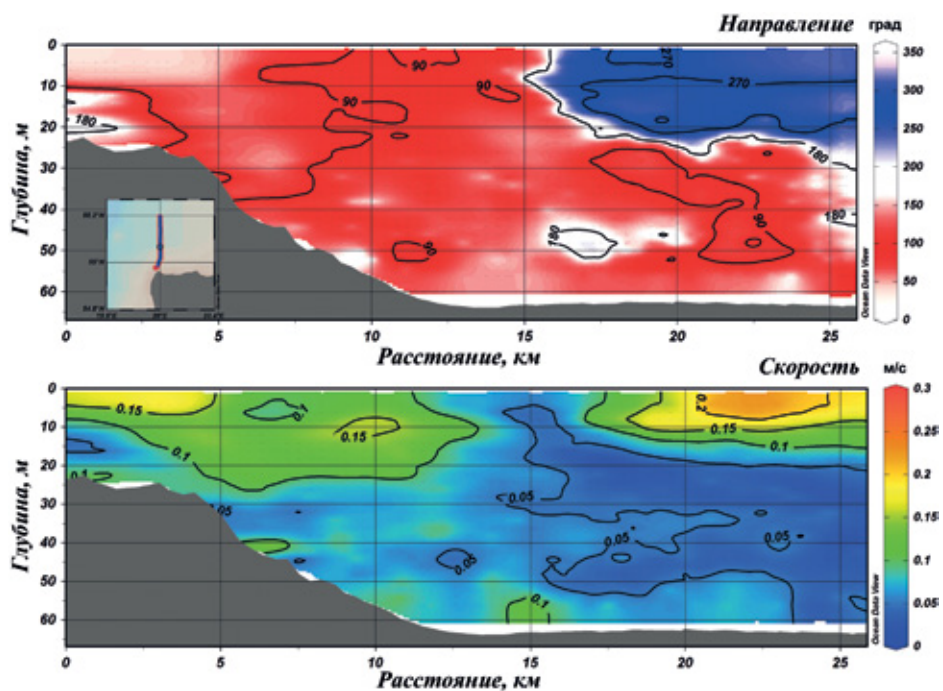


В дальнейшем при приближении к м. Таран скорость поверхностных течений вновь возросла до 15 см/с, а направление течения стало преимущественно восточным (см. рис. 3.78). Наличие смены направления течения вдоль разреза и характерное уменьшение его скорости в центральной части создало предпосылки для более детального анализа полученной информации на предмет обнаружения вихревой структуры. Совместный анализ радиолокационных и океанографических данных дал нам возможность оценить скорости движения вод внутри вихревого диполя, а также описать его трёхмерную структуру. Очевидно, что на периферии вихря обнаруживаются относительно высокие скорости течений по сравнению с центральной частью, где скорости практически нулевые. Это свидетельствует о некотором квазистационарном состоянии вихревого диполя, который практически оставался на одном месте в течение как минимум двух дней.

На рис. 3.79 представлено распределение скорости и направления течений по глубине в пределах разреза. Так как разрез ориентирован с юга на север, то красные и синие цвета обозначают западную и восточную компоненты направления течений, соответственно, а белый цвет — вдоль разреза, как в сторону берега, так и от него. Как показали измерения с помощью ADCP, вихревой диполь, отчётливо различимый на РЛИ, захватывает водные слои до глубины 15–20 м. Западная компонента течения и соответствующее уменьшение скорости потока от 25 до 10 см/с проявляются от поверхности (4 м) до глубины 20 м. Центральная область разреза, соответствующая центру диполя, характеризуется невысокими скоростями течений, близкими к 5 см/с, и однородностью по глубине. Ближе к м. Таран, вплоть до глубины 15 м, течение приобретает преимущественно восточное направление, а его скорость вновь увеличивается до 10–15 см/с. Из вышесказанного вытекает важный вывод о том, что вихревые образования, определяющиеся по радиолокационным снимкам, представляют собой не сугубо поверхностные проявления, а более масштабные океанографические процессы, способные определять характер гидродинамических условий региона.



Р и с. 3.78. Вихревой диполь по спутниковому изображению Radarsat-2 за 9.08.2014 г. и соответствующие поверхностные (на глубине 4 м) течения по данным буксировки ADCP 8.08.2014 г.



Р и с. 7.79. Распределение скорости и направления течений по глубине в пределах разреза, выполненного с помощью ADCP 8.08.2014 г.

По результатам подспутникового эксперимента было установлено следующее.

- Направление распространения вод из Калининградского залива в Гданьском заливе полностью согласуется с преобладающими направлениями течений в исследуемом регионе, которые в свою очередь формируются преимущественно ветром.
- Синхронные со съёмкой из космоса измерения с маломерных судов гидрологической структуры вод Калининградского залива, Балтийского пролива и прибрежной акватории Балтийского моря показали, что влияние выноса, область которого определялась по спутниковым изображениям, проявляется как в полях температуры и солёности, так и в рассеянии акустического сигнала, которое можно связать с мутностью вод. Проникновение вод выноса из пролива практически не распространялось глубже 5 м.
- Совместный анализ данных спутникового дистанционного зондирования и подспутниковых измерений показал, что спутниковые изображения, полученные в видимом диапазоне, предоставляют возможность достаточно точно определить область распространения выноса вод из залива, что подтверждается данными ADCP об акустическом рассеянии вод.

3.7. ПОВЫШЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ

Повышенное содержание взвешенного вещества в Финском заливе обусловлено как естественными причинами, такими как сток Невы и других мелких рек, последствиями сильных дождей и ветро-волновым перемешиванием в прибрежной зоне, так и техногенными факторами, связанными со строительством портов (Усть-Луга, Большой порт Санкт-Петербурга и многофункционального морского перегрузочного комплекса ММПК «Бронка») и строительством морского газопровода “Nord Stream” в 2010–2012 гг. В данном разделе мы рассмотрим только антропогенные факторы, связанные со строительными работами на берегах Финского залива или в самом заливе.

3.7.1. Морской газопровод “Nord Stream”

Морской газопровод “Nord Stream” («Северный поток») представляет собой транспортную систему, предназначенную для экспорта 55 млрд м³ природного газа в год из России в Германию и далее в Европейский Союз через акваторию Балтийского моря (от компрессорной станции ОАО «Газпром» вблизи бухты Портовая в Выборгском районе Ленинградской области до приёмного терминала вблизи населённого пункта Любмин в районе Грайфсвальда на северном побережье Германии). Строительство морской части газопровода в Финском заливе в 2010–2012 гг. и его эксплуатация в 2012–2013 гг. потребовали организации ежедневного спутникового мониторинга мутности вод (взвешенного вещества), температуры поверхности моря и ледяного покрова в районе производства работ [Гришин, Костяной, 2012, 2013; Grishin, Kostianou, 2012; Kostianou et al., 2014c].

При проведении многочисленных консультаций по экологическим аспектам проекта “Nord Stream” на международном (в рамках Конвенции об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте Европейской экономической комиссии ООН [Конвенция..., 1991; Гришин, 2007б]) и национальном [Гришин, 2007а] уровнях высказывались предложения о необходимости проведения “turbidity monitoring” (мониторинга мутности вод).

В соответствии с российским государственным стандартом по гидрологической терминологии [ГОСТ..., 1988], «мутность воды — весовое содержание взвешенных наносов в единице объёма смеси воды с наносами». Следовательно, “turbidity monitoring” или «мониторинг мутности вод» есть мониторинг распространения взвешенных наносов, проводимый для сравнения наблюдаемых значений концентрации взвешенных наносов с нормативно допустимым.

Основными факторами увеличения концентрации взвешенных наносов при строительстве морских газопроводов являются подготовка морского дна для укладки трубопровода путём сооружения гравийных опор в углублениях дна во избежание провисания трубы (pre-lay rock dumping) и последующая её засыпка гравием (post-lay rock dumping) для достижения устойчивости трубы на дне при транспортировке газа, а также сама укладка труб газопровода. Дноуглубительные работы в бухте Портовой при заглублении трубопровода в дно и пересечении с береговой линией также могли привести к увеличению мутности вод [Гришин, Костяной, 2012]. Оценки количества донных отложений, переходящих во взвешенное состояние в результате взаимодействия падающего гравия с дном при проведении отсыпок [Проект..., 2008; Offshore..., 2007], показывают, что при данной концентрации взвешенных частиц возможно их гидродинамическое взаимодействие [Гришин, 1982].

Следует отметить, что Балтийское море относительно мелководное, поэтому большое количество взвешенного вещества образуется в результате вертикального перемешивания (взмучивания) при сильном волнении на мелководье. Взмучивание вод происходит наиболее интенсивно в осенне-зимний период, когда скорость ветра наибольшая. Численные эксперименты по образованию и переносу взвешенного вещества в Балтийском море показали, что во многих случаях взвешенное вещество распространяется от поверхности до дна [Kuhrts et al., 2004].

Инструментальный мониторинг распространения мутности проводился по всей трассе газопровода “Nord Stream” [Overall Environmental..., 2010], в том числе и в водах Российской Федерации [Документация..., 2009]. Кроме этого, учитывая пожелания российских природоохранных и научных организаций (например, Государственного научно-исследовательского института озёрного и речного рыбного хозяйства Федерального агентства по рыболовству), с первого дня строительства газопровода в российских водах был организован ежедневный спутниковый мониторинг [Гришин, Костяной, 2012, 2013; Grishin, Kostianoy, 2012].

Целесообразность проведения спутникового мониторинга строительства газопровода “Nord Stream” отмечалась в различных научных публикациях [Костяной, Тетушкина, 2010; Kostianoy et al., 2008a, b] и при разработке системы производственного экологического мониторинга и контроля проекта “Nord Stream” [Ermakov et al., 2007].

В задачи спутникового мониторинга процесса строительства морского газопровода “Nord Stream” входило [Гришин, Костяной, 2012, 2013; Grishin, Kostianoy, 2012]:

- 1) выявление очагов мутных вод в районе строительства российской секции газопровода и в окружающих водах восточной части Финского залива;
- 2) определение ареалов распространения взвешенного вещества;
- 3) разграничение эффектов антропогенного воздействия от строительства газопровода и естественных природных процессов, приводящих к повышению мутности вод;
- 4) мониторинг трансграничного переноса взвешенных веществ.

Для целей спутникового мониторинга в 2010–2013 гг. нами были использованы все информативные (безоблачные по трассе газопровода) космические снимки, полученные со спектрорадиометров среднего разрешения (250–1000 м) MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua (NASA, США), и спектрометра среднего разрешения (260 м) MERIS, установленного на спутнике Envisat (Европейское космическое агентство).

На протяжении многих лет эти приборы активно используются для наблюдения за цветом океана/моря в открытом океане (чистые воды) или в прибрежной зоне (мутные воды). Эти измерения используются, в частности, для определения пространственного распределения взвешенного вещества и получения оценки их концентрации.

В случае данных MODIS ареалы распространения взвешенного вещества определялись визуально по изображениям, построенным в естественных цветах по комбинации оптических каналов 1-4-3 (RGB). Отличительной характеристикой спектрометра MERIS являлась возможность рассчитывать концентрацию общего взвешенного вещества (TSM — Total Suspended Matter) в абсолютных единицах ($\text{г}/\text{м}^3$) и строить карты с пространственным разрешением 260 м.

Это позволяет не только рассчитывать площади взмученных вод, но и более точно оценивать их концентрацию. Недостатком MERIS (в отличие от MODIS) являлось отсутствие данных в свободном доступе и не ежедневное покрытие исследуемого района. Именно поэтому для мониторинга распределения взвешенного вещества в Финском заливе использовались данные как MODIS, так и MERIS.

Работы на российской акватории (отсыпки гравийной смеси) были начаты 12 мая 2010 г. Достаточно ясная погода продержалась до 16 августа (затем облачные условия, к сожалению, сохранялись до 29 сентября и практически весь ноябрь и декабрь 2010 г.), благодаря чему удалось оперативно получить, обработать и проанализировать лишь 26 изображений MODIS и 23 изображения MERIS за 37 безоблачных дней в общей сложности [Гришин, Костяной, 2012, 2013; Grishin, Kostianoy, 2012]. Разница по времени между пролетами спутников составляла полтора-два часа, за которые иногда существенно менялись облачные условия над трассой газопровода, поэтому не всегда в один и тот же день удавалось получить информативные снимки и MODIS и MERIS.

Математическое моделирование распространения взвешенных частиц, проведенное при подготовке раздела «Воздействие на морскую среду (Приложение 4.1-2)» тома «Оценка воздействия на окружающую среду» проектной документации [Проект..., 2008], показало, что при проведении работ в бухте Портовая, включая создание временных дамб и траншеи, а также ликвидацию дамб и засыпку траншеи после укладки труб, а также при проведении отсыпок гравийной смеси, возможно кратковременное увеличение концентрации взвешенных наносов до величины 100 мг/л [Гришин, Костяной, 2013].

Сразу укажем, что результаты проведения экологического мониторинга (морского и спутникового) во время работ по строительству газопровода “Nord Stream” как в бухте Портовая, так и на глубоководной части акватории российских вод Финского залива показали, что реальные значения концентраций взвешенных наносов не только не превышали, но и не достигали вышеуказанных предельных значений, признанных Государственными экспертизами России допустимыми в течение определенного времени [Гришин, 2011; Гришин, Костяной, 2013].

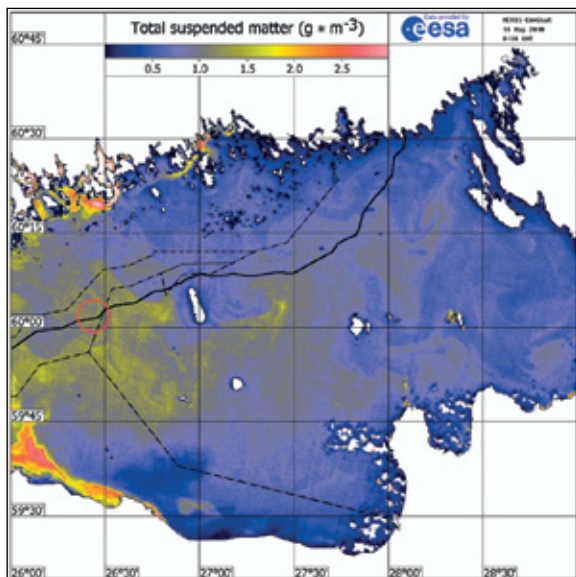
Строительные работы на глубоководном участке российской секции морского газопровода “Nord Stream” (от внешней границы российских вод до глубин, равных 14 м) были начаты 12 мая 2010 г. судном “Rollingstone”, которое производило подсыпки гравия на дно Финского залива с целью сооружения гравийных опор для уменьшения неровностей дна и достижения статической устойчивости газопровода. Для уменьшения взмучивания донных наносов при падении на дно частиц гравийно-каменной смеси и снижения воздействия на окружающую среду отсыпки производились через специальную трубу, опущенную с судна в придонную область, на расстоянии 2–3 м от дна [Гришин, Костяной, 2013].

За один рейс судно “Rollingstone” производило отсыпки гравийно-каменной смеси общим объёмом несколько тысяч кубических метров, после чего шло на загрузку следующей партии гравийно-каменной смеси в порт Котка (Финляндия). Для получения с помощью космических снимков информации о распространении взвешенных наносов в период отсыпок были использованы снимки, полученные в те дни, которые были с одной стороны безоблачными, а с другой стороны в эти дни судно должно работать на трассе газопровода, а не уходить на бункеровку. Анализ подобных снимков (с пространственным разрешением 260 м), типичные примеры которых за летнюю навигацию (май-август) 2010 г. приведены на рис. 3.80–3.84, показал, что распространение взвешенных наносов, обусловленное проведением отсыпок гравийно-каменной смеси, не обнаруживалось [Гришин, Костяной, 2013].

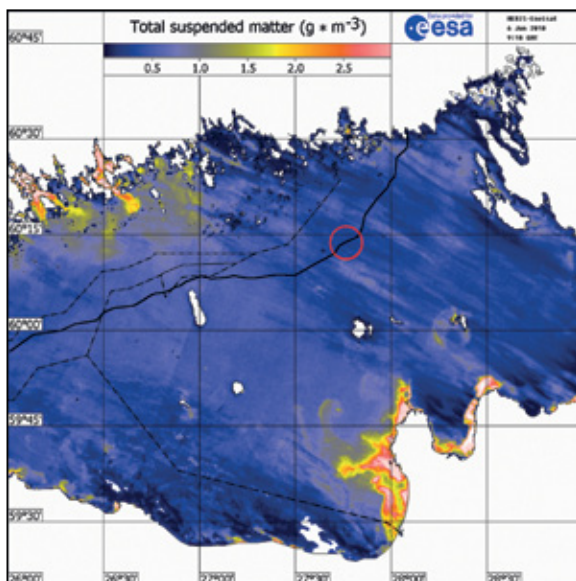
На этих и далее приведённых в настоящей работе рисунках чёрная сплошная линия означает центральную линию трассы газопровода “Nord Stream” в российских водах; пунктирные линии дают информацию о границах вод сопредельных государств в том виде, в котором они приведены в численной модели Seatrack Web Шведского метеорологического и гидрологического института, с указанием границ исключительных экономических зон России и Финляндии севернее острова Гогланд. Следует отметить, что не все морские границы в Финском заливе ратифицированы сопредельными государствами [Гришин, Костяной, 2013].

Спутниковый мониторинг показал, что наибольшее воздействие на окружающую морскую среду наблюдалось во время производства строительных работ в бухте Портовой. Строительные работы на участке пересечения береговой линии (отметки от +5 до –14 м) в бухте Портовая, приводящие к возникновению антропогенных полей взвешенных наносов (мутности), включают в себя [Гришин, Костяной, 2013]:

- строительство временных дамб для обеспечения работы наземной техники по разработке траншеи на прибрежном участке и для защиты траншеи от волнового воздействия;
- разработку траншеи на участке выхода газопровода на берег, в зоне дамб и на прибрежном мелководном участке;



Р и с. 3.80. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива при строительстве морского участка российской секции газопровода “Nord Stream” 16 мая 2010 г. (08:38 GMT) (©2010, ESA): **○** — место проведения отсыпки гравийно-каменной смеси [Гришин, Костяной, 2013]



Р и с. 3.81. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива при строительстве морского участка российской секции газопровода Nord Stream” 6 июня 2010 г. (09:18 GMT) (©2010, ESA): **○** — место проведения отсыпки гравийно-каменной смеси [Гришин, Костяной, 2013]

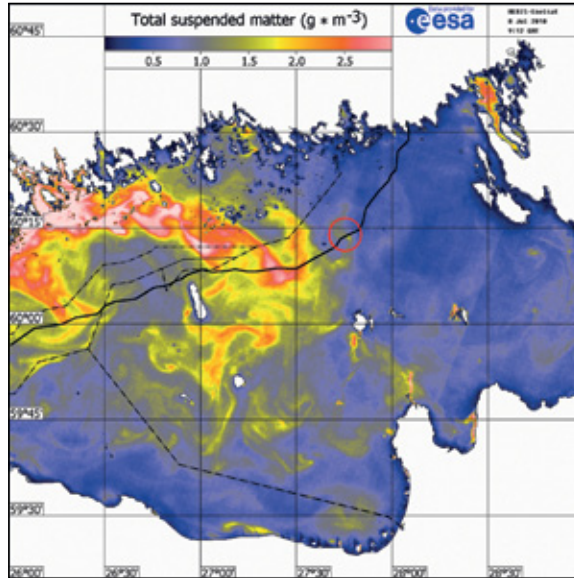


Рис. 3.82. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива при строительстве морского участка российской секции газопровода “Nord Stream” 8 июля 2010 г. (09:12 GMT) (©2010, ESA): **○** — место проведения отсыпки гравийно-каменной смеси [Гришин, Костяной, 2013]

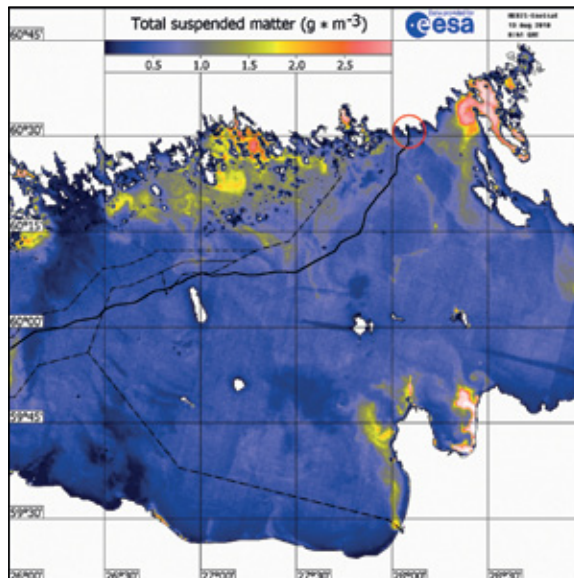


Рис. 3.83. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива при строительстве морского участка российской секции газопровода “Nord Stream” 13 августа 2010 г. (08:41 GMT) (©2010, ESA): **○** — место проведения отсыпки гравийно-каменной смеси [Гришин, Костяной, 2013]

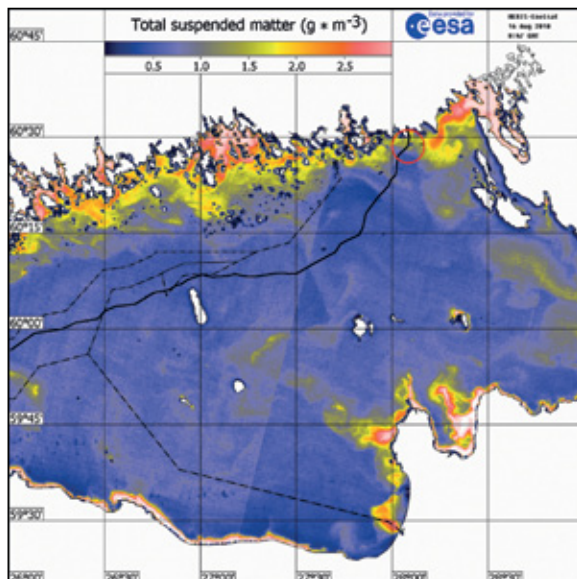
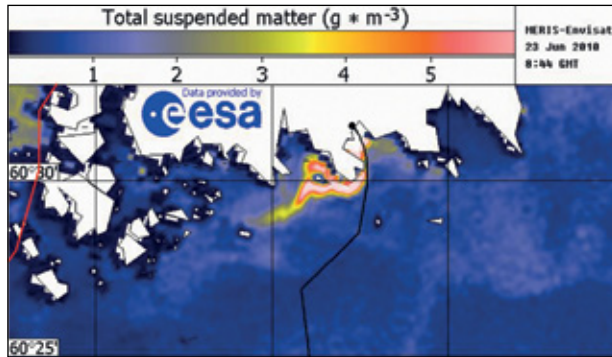


Рис. 3.84. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива при строительстве морского участка российской секции газопровода “Nord Stream” 16 августа 2010 г. (08:47 GMT) (©2010, ESA): **○** — место проведения отсыпки гравийно-каменной смеси [Гришин, Костяной, 2013]

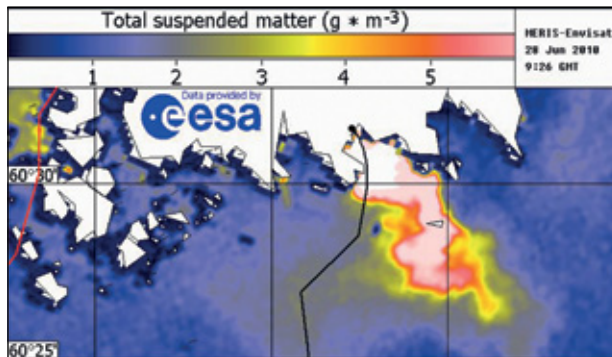
- укладку обеих ниток газопровода до глубины 14 м;
- ликвидацию временных дамб и засыпку траншеи после завершения строительства обеих ниток газопровода на участке пересечения береговой линии.

Безоблачные дни позволили сделать снимки распространения взвешенных веществ в бухте Портовая (рис. 3.85–3.89) при проведении различных видов работ и при различных направлениях течений, разносящих взвешенные наносы от места проведения этих работ.

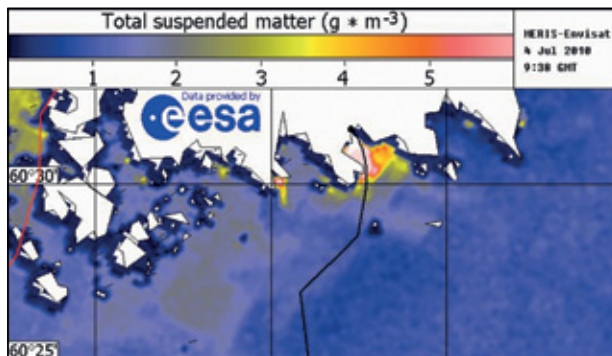
Наиболее чётко формирование полей взвеси, относящихся к строительству российской секции газопровода “Nord Stream”, прослеживается в бухте Портовой при строительстве дамб и проведении дноуглубительных работ. Спутниковые изображения за 23 и 28 июня, 4, 5, 12, 14 и 20 июля и 16 августа действительно показали очаги взмученных вод в бухте Портовой, но их площади составляли 1–4 км² (см. рис. 3.85–3.89). Самая большая площадь взмученных вод в районе бухты Портовой наблюдалась 28 июня и составляла порядка 150 км² (рис. 3.86). Чёрная линия на снимках указывает трассу газопровода. Концентрации взвеси в очагах наиболее мутных вод превышали ПДК по российским нормам (ПДК = 10 мг/дм³ или 10 г/м³) только 23, 28 июня и 4 июля (до 15 г/м³) (рис. 3.85–3.87). В эти дни площади вод с превышением ПДК составляли 2; 8 и 1 км², соответственно. В другие дни площади взмученных вод составляли единицы квадратных километров, а их концентрации не превышали 6 г/м³ [Гришин, Костяной, 2013].



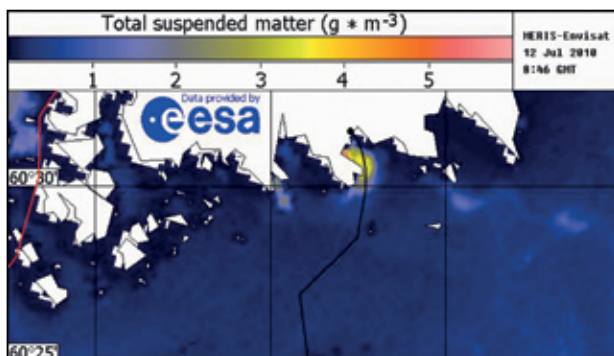
Р и с. 3.85. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое бухты Портовая при строительстве прибрежного участка российской секции газопровода “Nord Stream” 23 июня 2010 г. (08:44 GMT) (©2010, ESA) [Гришин, Костяной, 2013]



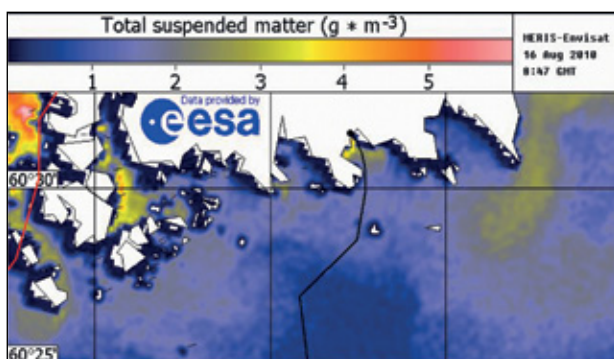
Р и с. 3.86. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое бухты Портовая при строительстве прибрежного участка российской секции газопровода “Nord Stream” 28 июня 2010 г. (09:26 GMT) (©2010, ESA) [Гришин, Костяной, 2013]



Р и с. 3.87. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое бухты Портовая при строительстве прибрежного участка российской секции газопровода “Nord Stream” 4 июля 2010 г. (09:38 GMT) (©2010, ESA) [Гришин, Костяной, 2013]



Р и с. 3.88. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое бухты Портовая при строительстве прибрежного участка российской секции газопровода “Nord Stream” 12 июля 2010 г. (08:46 GMT) (©2010, ESA) [Гришин, Костяной, 2013]



Р и с. 3.89. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое бухты Портовая при строительстве прибрежного участка российской секции газопровода “Nord Stream” 16 августа 2010 г. (08:47 GMT) (©2010, ESA) [Гришин, Костяной, 2013]

23 июня 2010 г. в бухте Портовая проводились интенсивные работы: один земснаряд производил расчистку траншеи на расстоянии 350–400 м от нулевого пикета (километровой отметки), расположенного вблизи среднего положения береговой линии, а другой земснаряд готовил трассу на расстоянии 4,6–4,8 км от нулевого пикета. В то же время экскаваторы разравнивали грунт вблизи береговой линии (200–300 м от нулевого пикета). Течение было направлено в сторону морской границы с Финляндией (см. рис. 3.85), однако облака переносимых течением взвешенных частиц не достигали этой границы, отмеченной на рисунках красной линией [Гришин, Костяной, 2013].

Следующее спутниковое изображение бухты Портовая (см. рис. 3.86) датировано 28 июня 2010 г., когда экскаваторы проводили подготовку траншеи для укладки труб на расстоянии от 200 м от нулевого пикета до этого пикета и далее — около 130 м в сторону суши. В этот день течение существенно изменило направление, и облака взвеси относилось в сторону от границы с Финляндией. Таким образом, как и в ситуации, изображённой на предыдущем снимке (см. рис. 3.85), трансграничное воздействие на воды Финляндии не оказывалось [Гришин, Костяной, 2013].

Интенсивная обработка траншеи производилась земснарядом 4 и 12 июля 2010 г., при этом облака взвешенных частиц практически не покидали бухту Портовая (рис. 3.87 и 3.88). Аналогичная картина наблюдалась и 16 августа 2010 года при проведении отсыпок грунта на расстоянии 4850–5350 м от нулевого пикета (рис. 3.89) [Гришин, Костяной, 2013].

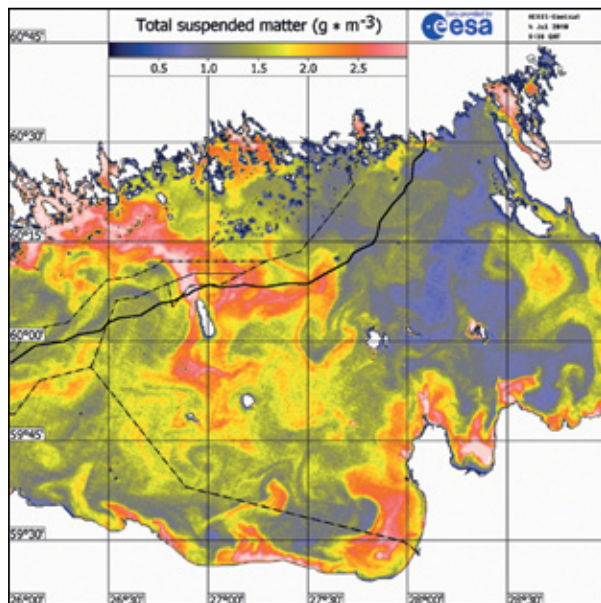
Как показал анализ спутниковых изображений, в большинстве случаев антропогенные облака взвешенных наносов, обусловленных строительством газопровода “Nord Stream”, не покидали акватории бухты Портовая или относились в сторону территории России. В тех немногочисленных случаях, когда течения были направлены в сторону границы Финляндии, облака взвеси вследствие турбулентного перемешивания и оседания частиц не достигали этой границы [Гришин, Костяной, 2013].

Незначительность влияния работ по строительству российской секции газопровода “Nord Stream” на формирование полей взвешенных наносов по сравнению с их полями, обусловленными природными факторами (ветро-волновое перемешивание, береговой сток после дождей), хорошо видно из сравнения спутниковых изображений бухты Портовая (см. рис. 3.87 и 3.88) и всей трассы газопровода в российских водах (рис. 3.90 и 3.91), сделанных 4 и 12 июля, соответственно, когда по трассе газопровода не проводилось ни одной отсыпки гравийно-каменной смеси. По сравнению с крупномасштабными интенсивными взвесенесущими течениями и вихрями, двигающимися в российские воды со стороны Финляндии, поля взвеси, обусловленные работами по строительству газопровода в бухте Портовая, практически не видны (см. рис. 3.90 и 3.91) [Гришин, Костяной, 2013].

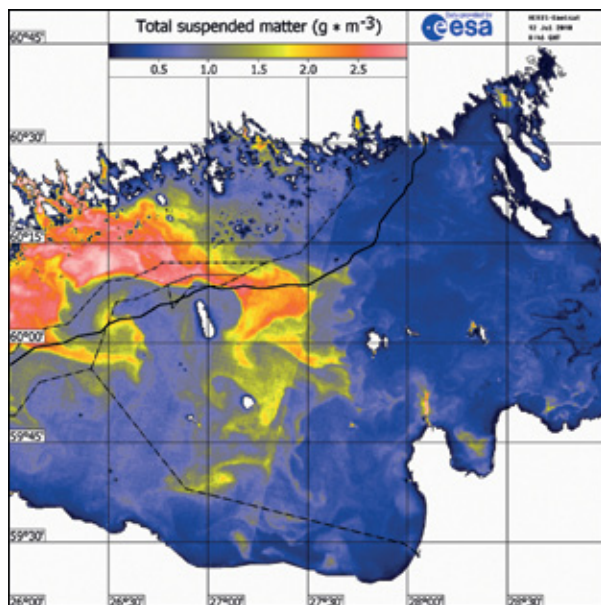
В период с 12 мая по 30 сентября 2010 г. вдоль побережий Финляндии, Эстонии, южного берега России и в Выборгском заливе периодически появлялись шлейфы взмученных вод (абсолютные концентрации взвеси достигали $8\text{--}10\text{ г/м}^3$), источником которых, по-видимому, является ветро-волновое перемешивание прибрежных вод и сток мелких рек после проходивших дождей. Площадь этих вод с повышенным содержанием взвеси (в результате естественных факторов) в отдельных местах составляла десятки и сотни квадратных километров, а в июле 2010 г. она достигла тысячи квадратных километров (см. рис. 3.90) [Гришин, Костяной, 2013]. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива 2 июля 2012 г. показало, что в крайней западной части залива повышенная концентрация взвеси наблюдалась на акватории порядка 4 тыс. км².

Следует отметить, что мезомасштабные и мелкомасштабные вихревые структуры (вихри, струи и диполи с характерным горизонтальным масштабом 5–30 км) существенным образом влияют на перераспределение взвеси в море и могут выносить воды с повышенным содержанием взвеси на расстояния до 50–100 км от берега (см. рис. 3.90).

Трансграничный перенос взвешенного вещества является важным фактором увеличения мутности вод в соответствующих районах Финского залива. В июле 2010 г. в течение двух недель наблюдался перенос взмученных вод (до 4 г/м^3) с акватории Финляндии на акваторию Российской Федерации, в том числе на трассу морского газопровода “Nord Stream” (см. рис. 3.90 и 3.91). Этот факт однозначно подтверждается серией спутниковых изображений за 4–15 июля 2010 г. и отсутствием работ по отсыпке грунта. Перенос взмученных вод из районов строительства газопровода на акваторию Финляндии на полученных спутниковых изображениях зафиксирован не был [Гришин, Костяной, 2013].



Р и с. 3.90. Поля взвеси естественного происхождения в поверхностном слое Финского залива 4 июля 2010 г. в момент отсутствия проведения отсыпок по трассе газопровода “Nord Stream” (09:38 GMT) (©2010, ESA) [Гришин, Костяной, 2013]



Р и с. 3.91. Поля взвеси естественного происхождения в поверхностном слое Финского залива 12 июля 2010 г. в момент отсутствия проведения отсыпок по трассе газопровода “Nord Stream” (08:46 GMT) (©2010, ESA) [Гришин, Костяной, 2013]

На изображении от 4 июля 2010 г. (см. рис. 3.90) наблюдаются очаги сильно взмученных вод практически вдоль всего южного побережья Финского залива (Эстония и Россия), вдоль побережья Финляндии, в Выборгском заливе и ареал взмученных вод в бухте Портовой. Наиболее интересной и обширной областью вод с повышенной концентрацией взвеси является район между берегом Финляндии в районе 26° – $26^{\circ}30'$ в.д. и островом Гогланд. Судя по максимуму концентрации взвеси, источником взвеси является прибрежный район Финляндии, однако другой максимум находится между островом Гогланд и трассой газопровода.

С другой стороны, вид этого шлейфа говорит о том, что он двигался от берега до острова Гогланд (55 км), затем расщепился на две струи — восточную длиной 45 км, и южную длиной 40 км. Ширина шлейфа у берега — 40 км, в мористой части — 5–10 км. Концы взмученных струй размываются в разных направлениях мезомасштабными вихрями диаметром 5–10 км [Гришин, Костяной, 2013].

На изображении от 12 июля 2010 г. (см. рис. 3.91) очаги взмученных вод вдоль всего южного побережья Финского залива (Эстония и Россия) и в бухте Портовой практически исчезли, а в Выборгском заливе — остались. Обширная область вод с повышенной концентрацией взвеси между берегом Финляндии и о. Гогланд за несколько суток изменилась под действием ветра и течений. Максимум концентрации взвеси, по-прежнему, находится у берега Финляндии, а масштабы струи практически не уменьшились. Источником взвеси является район прибрежных вод Финляндии, шлейф которых обходит о. Гогланд с востока и тянется на юг уже в виде пятнистой структуры до границы с Эстонией. Общая длина этого шлейфа достигает 140 км при ширине 5–20 км. Новая струя взмученных вод «потеряла» свой антициклонический вихрь и теперь движется на восток с циклоническим вихрем на конце струи. Вся область взмученных вод размывается мезомасштабными и мелкомасштабными вихревыми структурами [Гришин, Костяной, 2013].

На рис. 3.92 представлен пример ареала распространения взвешенного вещества до начала строительства газопровода (9 мая 2006 г.), который нанесён на спутниковое изображение в виде чёрной линии. Источником взвеси являются естественные природные процессы и явления, которые периодически наблюдаются в различных районах Финского залива. В данном примере, как и в ряде других случаев, наблюдались очаги взмученных вод у побережья Финляндии, в которых концентрация взвеси была достаточно велика. Эти данные подтверждаются и картами мутности Финского института окружающей среды за 2006–2009 гг. [Гришин, Костяной, 2012].

Таким образом, анализ результатов спутникового мониторинга в совокупности с анализом метеорологической информации позволил разграничить и оценить количественно эффекты антропогенного воздействия от строительства газопровода “Nord Stream” и естественных процессов взмучивания вод Балтики [Отчет..., 2011]. Полученные в 2010 г. результаты позволили прийти к выводу о том, что пространственные масштабы областей повышенной мутности вод за счёт естественных процессов могут в десятки и сотни раз превышать масштабы ареалов распространения взвешенного вещества, обусловленных антропогенным воздействием — строительством российской секции газопровода “Nord Stream” [Гришин, Костяной, 2012, 2013]. Спутниковый мониторинг позволил говорить также и об отсутствии трансграничного воздействия строительства глубоководного участка российской секции морского газопровода “Nord Stream” на воды Финляндии.

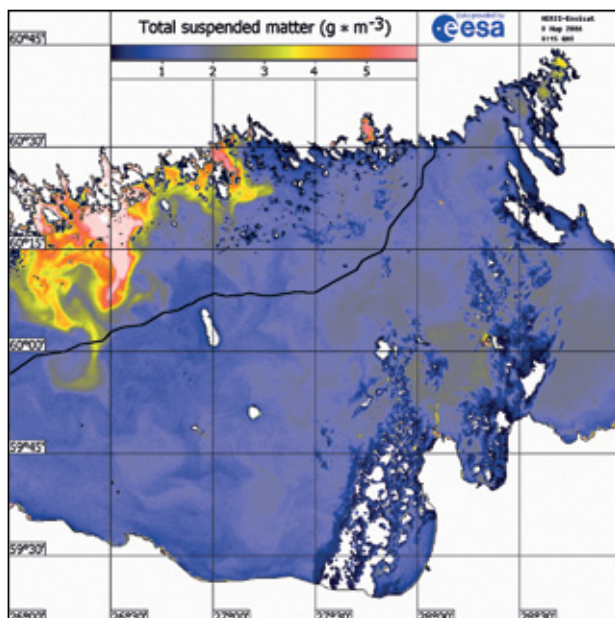


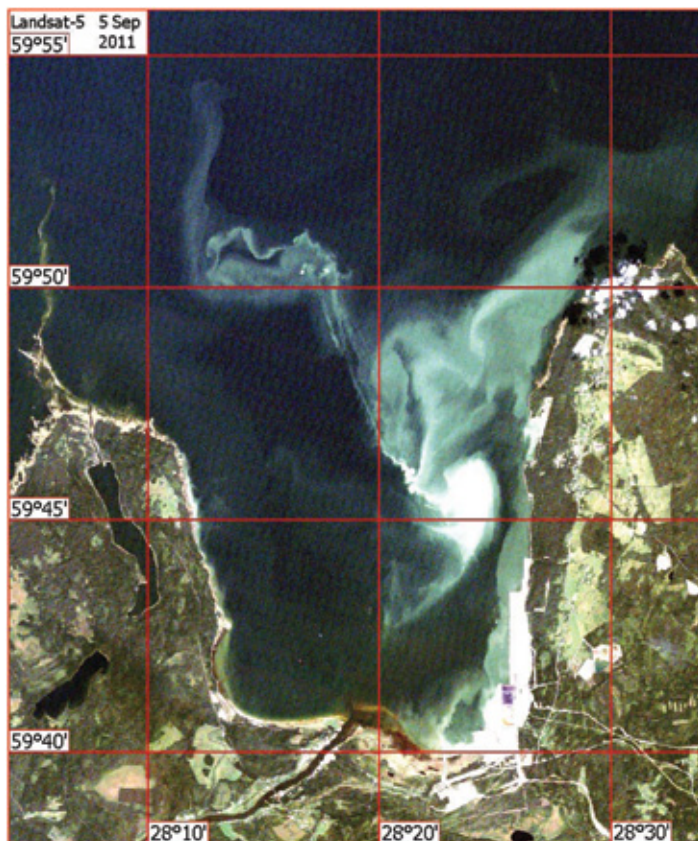
Рис. 3.92. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива 9 мая 2006 г. (09:15 GMT) — до начала строительства газопровода “Nord Stream” по данным MERIS Envisat (©2006, ESA) [Гришин, Костяной, 2012]

3.7.2. Порт Усть-Луга

Усть-Лу́га — морской торговый порт, расположенный в Лужской губе Финского залива вблизи посёлка Усть-Луга. Название порту было присвоено 12 декабря 2000 г. Порт (угольный терминал) начал работу в декабре 2001 г., при этом существующий лесной терминал в устье реки Луга был включён в состав порта. Генеральная схема развития морского торгового порта Усть-Луга предполагает строительство 16 перегрузочных комплексов.

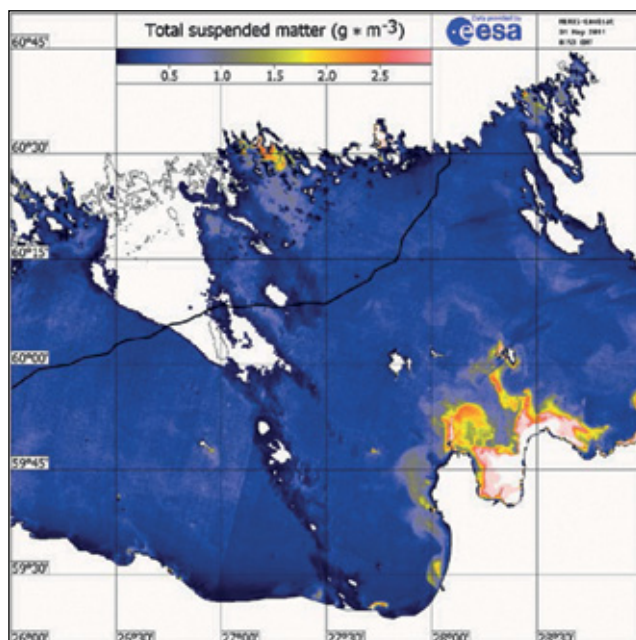
Лужская губа расположена в 70 км от границы Санкт-Петербурга в юго-восточной части Финского залива и вдаётся в южный берег на 20 км между мысом Кургальским на западе и мысом Колганпя на востоке. Условия навигации в этой части Финского залива позволяют осуществлять круглогодичную эксплуатацию порта с коротким периодом ледовой проводки, при этом продолжительность навигации без использования ледоколов в Лужской губе доходит до 326 дней в году.

Уже в 2011 г. крупнотоннажные морские суда осуществляли вход и выход в порт по Южному подходному каналу (Лужский Морской канал). В 2009 г. канал был реконструирован — расширен до 180 м и углублён до 16 м. Максимальная разрешённая проходная осадка 13,7 м. После реконструкции длина канала составила 5,7 км. Строительство перегрузочных комплексов и подходного канала потребовало проведения значительных дноуглубительных работ, которые приводили к значительному взмучиванию вод, что фиксировалось нами при проведении спутникового мониторинга строительства газопровода “Nord Stream” (рис. 3.93).

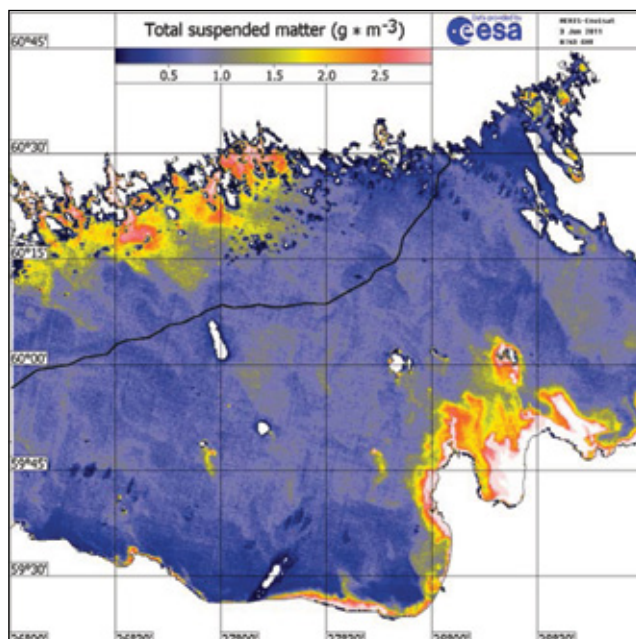


Р и с. 3.93. Строительные работы в Лужской губе 5 сентября 2011 г. по данным спутника Landsat-5 (пространственное разрешение 30 м)

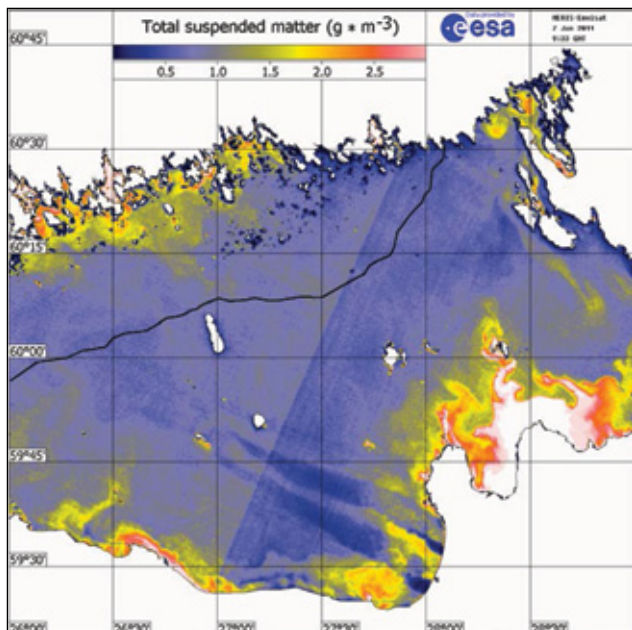
Так, например, с 15 мая и до конца 2011 г. обширная область сильно взмученных вод ($>6 \text{ г/м}^3$) постоянно наблюдалась в Лужской губе (между $28^{\circ}10'$ и $28^{\circ}30'$ в. д.). Площадь этих вод составляла $50\text{--}200 \text{ км}^2$, например, 31 мая — 200 км^2 (рис. 3.94), 3 июня — 200 км^2 (рис. 3.95), 7 июня — 200 км^2 (рис. 3.96), 2 августа — 150 км^2 (рис. 3.97), 26 августа — 150 км^2 (рис. 3.98). Поток взмученных вод (в зависимости от направления ветра и течений) часто распространялся на запад, северо-запад, север, северо-восток или на восток на расстояния $30\text{--}70 \text{ км}$ от берега Лужской губы. Таким образом, техногенное воздействие на окружающую морскую среду, связанное со строительством морского порта Усть-Луга, на два порядка (по площади взмученных вод) превышало воздействие от строительства морского газопровода “Nord Stream”. Общая площадь взмученных вод в Лужской губе и за её пределами достигала 1000 км^2 . Для сравнения, в 2011 г. в Финском заливе площадь вод с повышенным содержанием взвеси (в результате естественных факторов) в отдельных местах составляла от сотен до нескольких тысяч квадратных километров. Например, 26 мая — 1000 км^2 , 3 июня — 1200 км^2 , 4 июня — 1800 км^2 , 29 июня — 2000 км^2 , 13 августа — 2200 км^2 , 27 сентября — 2000 км^2 , 2 октября — 2400 км^2 .



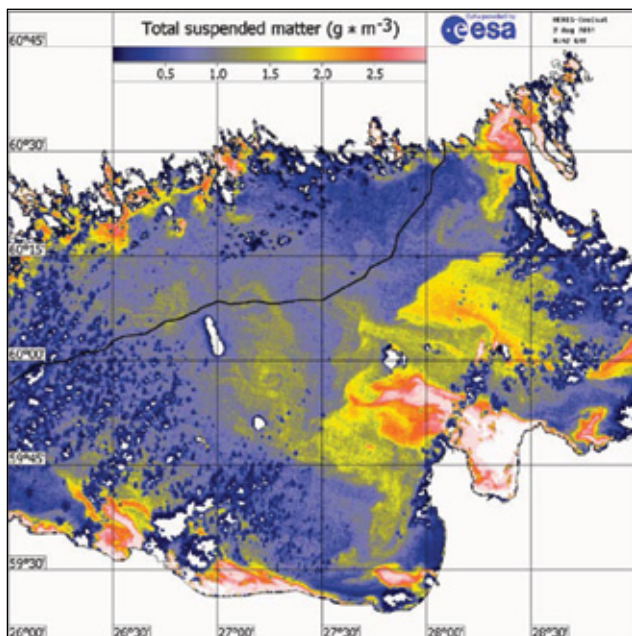
Р и с. 3.94. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива 31 мая 2011 г. (08:53 GMT) (©2011, ESA)



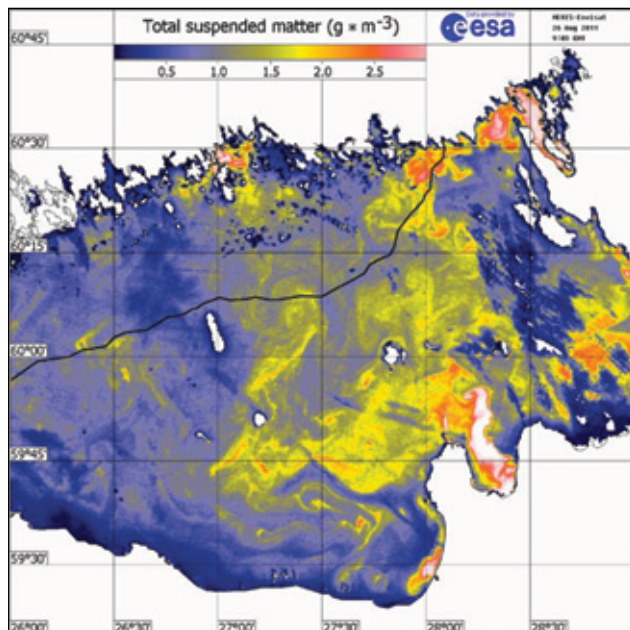
Р и с. 3.95. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива 3 июня 2011 г. (08:43 GMT) (©2011, ESA)



Р и с. 3.96. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива 7 июня 2011 г. (09:33 GMT) (©2011, ESA)



Р и с. 3.97. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива 2 августа 2011 г. (08:42 GMT) (©2011, ESA)

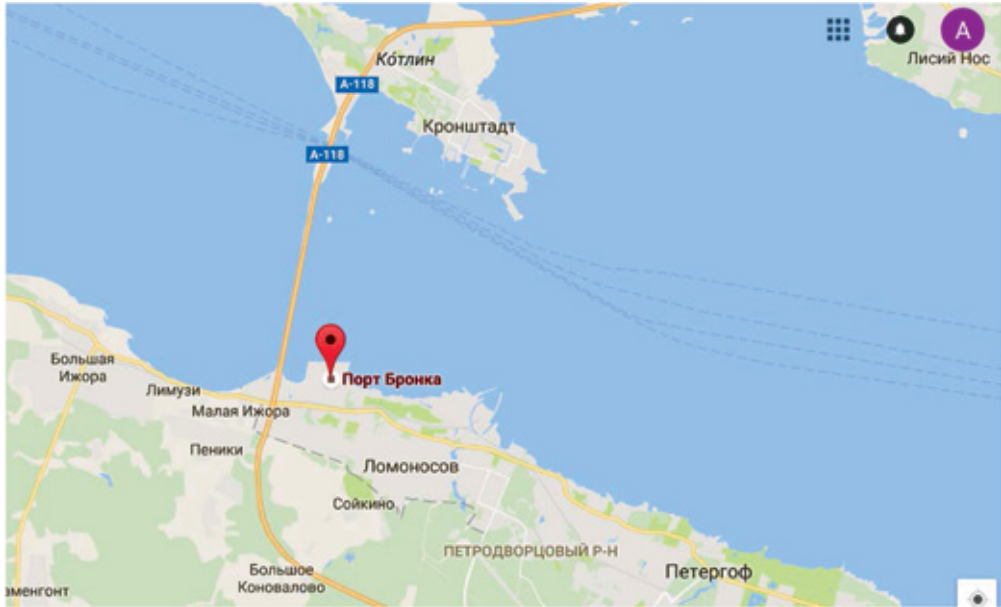


Р и с. 3.98. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое Финского залива 26 августа 2011 г. (09:03 GMT) (©2011, ESA)

3.7.3. ММПК «Бронка»

В Санкт-Петербурге, на южном берегу Невской губы Финского залива идёт строительство многофункционального морского перегрузочного комплекса (ММПК) «Бронка». Комплекс расположен к северо-востоку от пересечения Кольцевой автомобильной дороги вокруг Санкт-Петербурга (А118) и дороги А120 (рис. 3.99).

Строительство порта началось в январе 2011 г. 15 декабря 2015 г. завершена первая очередь строительства, и порт был введён в эксплуатацию. Построено шесть причалов, подъездные железнодорожные пути и развязка с кольцевой автодорогой. Введён в эксплуатацию контейнерный терминал мощностью 1,45 млн TEU (эквивалент двадцатифунтового контейнера) в год и терминал накатных грузов на 260 тыс. единиц автомобильной и специальной техники в год. В конце ноября 2016 г. были практически завершены дноуглубительные работы на подходном канале, подходная глубина доведена до 11,2 м. Планируется в 2017 г. довести её до 14,4 м. Учитывая, что всё южное побережье Невской губы (впрочем, и северное тоже) имеет глубины 0,5–2,0 м на расстоянии 800–1200 м от берега, при строительстве аванпорта Бронка пришлось вести колоссальные по объёму дноуглубительные и намывные работы. Это вызвано необходимостью принимать многотоннажные суда, так как общемировая тенденция — увеличение тоннажа судов, и в среднесрочной перспективе выживут только те порты, которые могут обрабатывать большие суда. Бронка как аванпорт Санкт-Петербурга рассчитан на приём океанских судов.

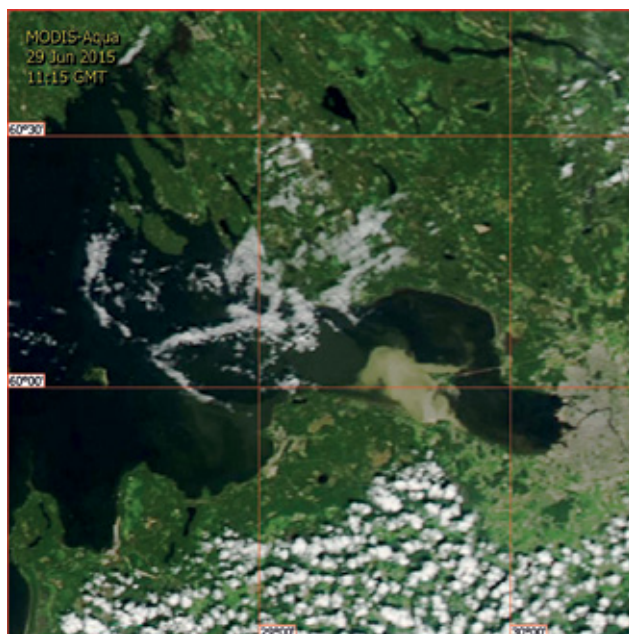


Р и с. 3.99. Расположение ММППК «Бронка»

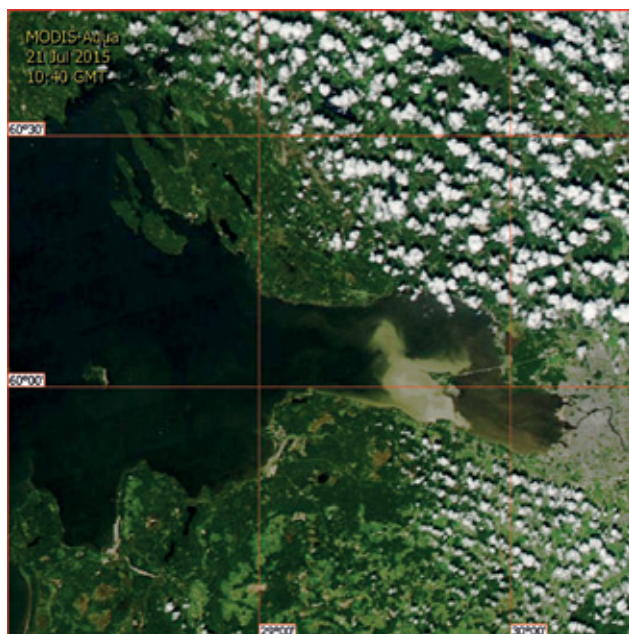
Основные работы по дноуглублению проводились в 2015 г. Они привели к значительному взмучиванию окружающих вод, что хорошо видно на цветосинтезированных спутниковых изображениях видимого диапазона спектра, как среднего — 250 м (рис. 3.100а–в), так и высокого — 30 м пространственного разрешения (рис. 3.101). Несмотря на то, что данные изображения получены при разных полях ветра: 29 июня и 21 июля при слабом западном ветре, а 23 августа в условиях слабого северо-восточного ветра, облако взвеси распространялось в северо-западном направлении, и площадь вод с повышенным содержанием взвеси составляла более 400 км². На спутниковом изображении ETM+ Landsat-7 (см. рис. 3.101), полученном 29 июня 2015 г. практически одновременно с изображением MODIS Terra (разница составила 15 мин) хорошо видно влияние мезомасштабных и мелкомасштабных вихревых структур (вихри, струи и диполи с характерным горизонтальным масштабом 5–30 км) на распространение взвеси по заливу.

Концентрация взвеси в непосредственной близости к району работ по дноуглублению настолько высока, что стандартные алгоритмы NASA, разработанные для построения карт TSM по данным сенсора MODIS, не определяют данный район, как морскую среду, считая его сушей (рис. 3.102).

Возможно, наибольшее впечатление об интенсивности загрязнений взвешенным веществом в районе работ производит изображение OLI Landsat-8, полученное 11 октября 2015 г. в условиях слабого северного ветра (рис. 3.103). Шлейф взмученных вод распространился на запад более чем на 40 км. Для сравнения, на рис. 3.104 представлено изображение, полученное тем же сенсором, но в период, когда строительные работы уже закончились. Естественное взмучивание присутствует, но в существенно меньших масштабах.

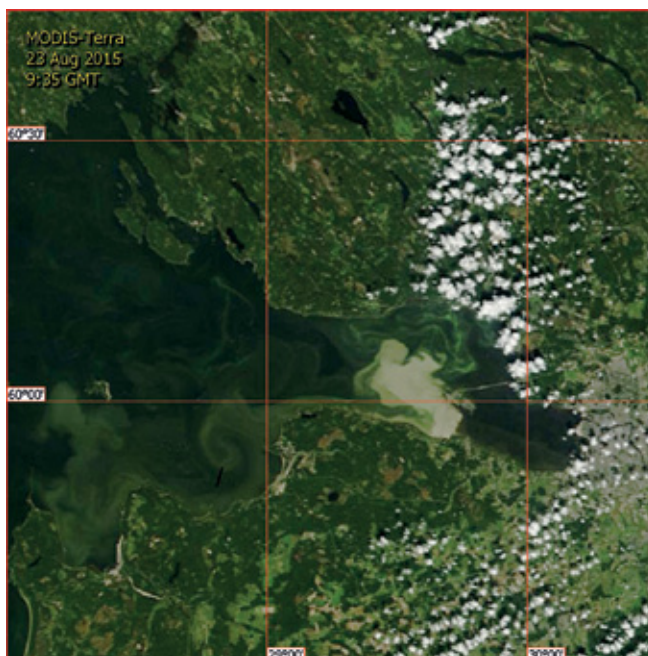


a



б

Р и с. 3.100*a, б*. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое восточной части Финского залива во время проведения дноуглубительных работ при строительстве ММПК «Бронка» летом 2015 г.: *a* — 29 июня 2015 г. 09:25 GMT (MODIS Terra); *б* — 21 июля 2015 г. 10:40 GMT (MODIS Aqua)

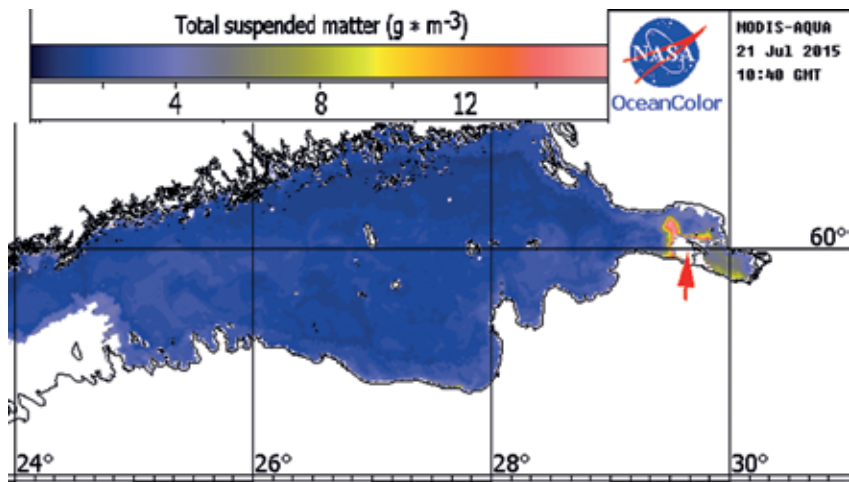


6

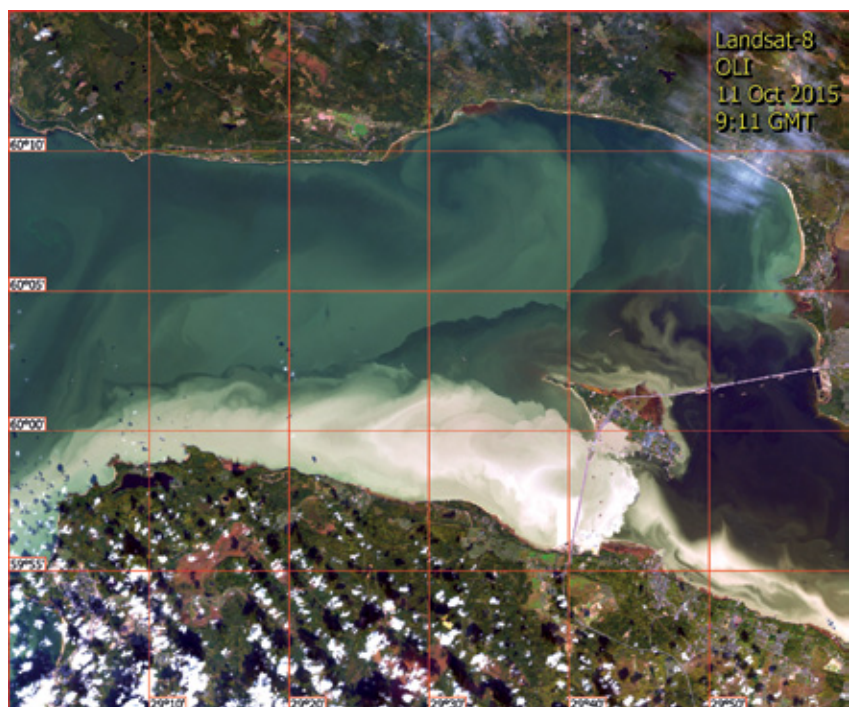
Рис. 3.100в. Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое восточной части Финского залива во время проведения дноуглубительных работ при строительстве ММПК «Бронка» 23 августа 2015 г. 09:35 GMT (MODIS Terra)



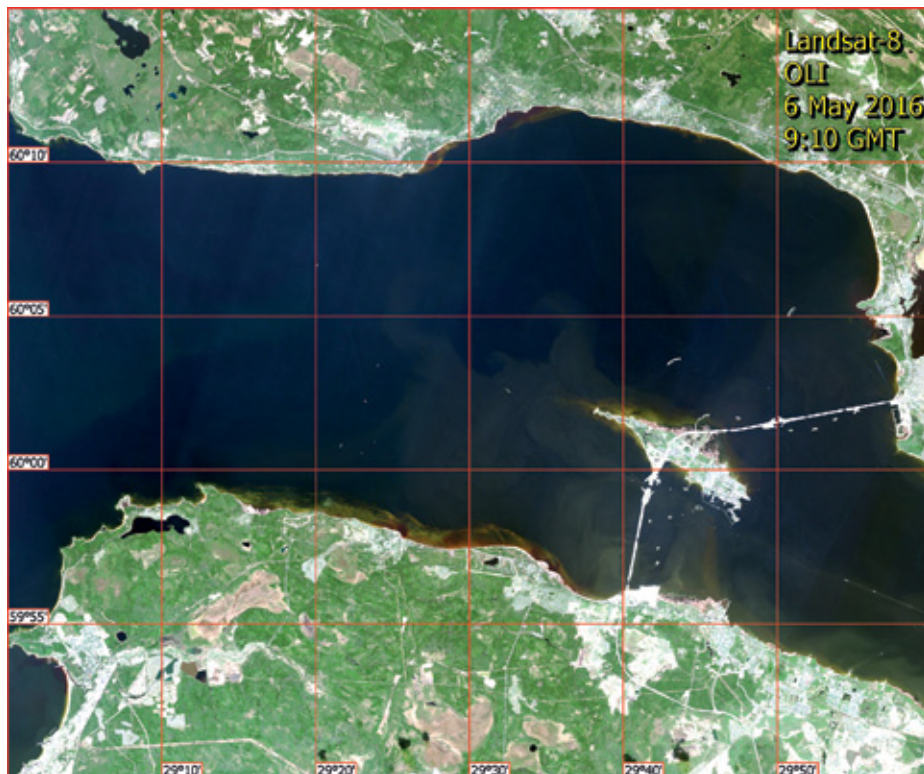
Рис. 3.101. Проявление распределения взвеси в поверхностном слое восточной части Финского залива на цветосинтезированном изображении (3-2-1 спектральные каналы) ETM+ Landsat-7, полученном 29 июня 2015 г. с пространственным разрешением 30 м



Р и с. 3.102. Повышенное содержание взвеси в восточной части Финского залива во время проведения дноуглубительных работ при строительстве ММПК «Бронка» (MODIS Aqua, 21 июля 2015 г. 10:40 GMT). Стрелкой отмечен район повышенной концентрации, который на картах TSM распознается как суша



Р и с. 3.103. Проявление распределения взвеси в поверхностном слое восточной части Финского залива на цветосинтезированном изображении (4-3-2 спектральные каналы) OLI Landsat-8, полученном 11 октября 2015 г. с пространственным разрешением 30 м



Р и с. 3.104. Проявление естественного взмучивания в районе ММПК «Бронка» на изображении OLI Landsat-8 от 6 мая 2016 г.

Несмотря на то, что пропускная способность первой очереди ММПК «Бронка» позволяет обрабатывать 1,45 млн TEU контейнерных и 260 тыс. единиц накатных грузов в год, а в 2017 г. планировалось увеличение контейнерного терминала до 1,9 млн TEU, с февраля по декабрь 2016 г. в порту было перевалено только 32 тыс. TEU (<https://ok-inform.ru>). Было решено, что в условиях низкого рынка и современной геополитики нет целесообразности расширять порт, поэтому стройка заморожена (данные на конец 2016 г.).

Следует отметить, что ММПК «Бронка» располагается на особо охраняемой природной территории «Плавни Кронколонии», которая в свою очередь является одной из составных частей регионального комплексного государственного природного заказника «Южное побережье Невской губы». Как опасаются экологи, любая застройка окружающей территории и акватории экологически опасными объектами (порты, транспортные артерии, логистические объекты), рост грузоперевозок и судоходства в акватории, непосредственно прилегающей к заказнику, неизбежно окажет негативное воздействие на его экосистему. Поэтому проведение постоянного экологического мониторинга, в частности, посредством спутникового дистанционного зондирования, позволяющего оценить всю масштабность загрязнений морской среды, на наш взгляд, жизненно необходима.

3.8. ЗОНЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

Опираясь на результаты нашего многолетнего спутникового мониторинга Балтийского моря, которые описаны в предыдущих разделах данной главы, и на основе комплексного анализа всей совокупной информации об источниках загрязнений и механизмах их распространения, были определены устойчивые зоны экологического риска, т.е. районы, наиболее подверженные нефтяным загрязнениям, «вредоносным» цветениям водорослей и повышенным концентрациям взвешенного вещества.

Для Балтийского моря ими являются (рис. 3.105):

1. Юго-восточная часть Финского залива — обширные области загрязнений, связанных со строительством многофункционального морского перегрузочного комплекса «Бронка», сбросом плохо очищенных сточных вод в районе г. Ломоносова, интенсивным цветением фитопланктона, слабой вентиляцией Невской губы, активным судоходством.
2. Северо-западная акватория Финского залива — высокий риск судовых нефтяных загрязнений и биогенные загрязнения, связанные с интенсивным цветением водорослей.
3. Северная часть Готландского бассейна — ежегодное интенсивное цветение водорослей.
4. Акватории южнее и восточнее о. Готланд — регулярные сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты, вдоль основных судовых трасс.
5. Куршская коса — риск нефтяного загрязнения в случае аварии на платформе D-6. Куршский залив — ежегодное интенсивное цветение водорослей.
6. Хельская коса, Гданьский залив — высокий риск судовых нефтяных загрязнений, повышение содержания взвешенного вещества, связанное с вытоком реки Вислы и из Балтийского пролива. Вислинский (Калининградский) залив — ежегодное интенсивное цветение водорослей. Бухта Приморская Калининградского залива — постоянный сброс плохо очищенных сточных вод из Калининградского отводного канала.

Как видно на рис. 3.105, все перечисленные зоны экологического риска совпадают с районами, которые международными организациями, в частности HELCOM, признаны как морские охраняемые районы (МОР). Международный союз охраны природы даёт следующее определение МОР: «Чётко определённое географическое пространство, которое признается, предназначено и управляется с помощью правовых или других эффективных мер для достижения долгосрочного сохранения природы со связанными экосистемными услугами и культурными ценностями» [Kostianoy et al., 2014b]. В мире существует много типов МОР, которые имеют широкий круг целей по сохранению. МОР позволяют защищать и восстанавливать экосистемы, в том числе различные виды животных, рыб и растений и места их обитания, сохранять биологическое разнообразие морской флоры и фауны, предоставляют природные территории для проведения научных исследований и обеспечивают возможность общественности наслаждаться природой.

Всемирная база данных по морским охраняемым районам (World Database on Marine Protected Areas) содержит в своей системе информацию о более чем 5000 МОР в мире, 90 % из них имеют национальный и 10 % — международный статус [World database].

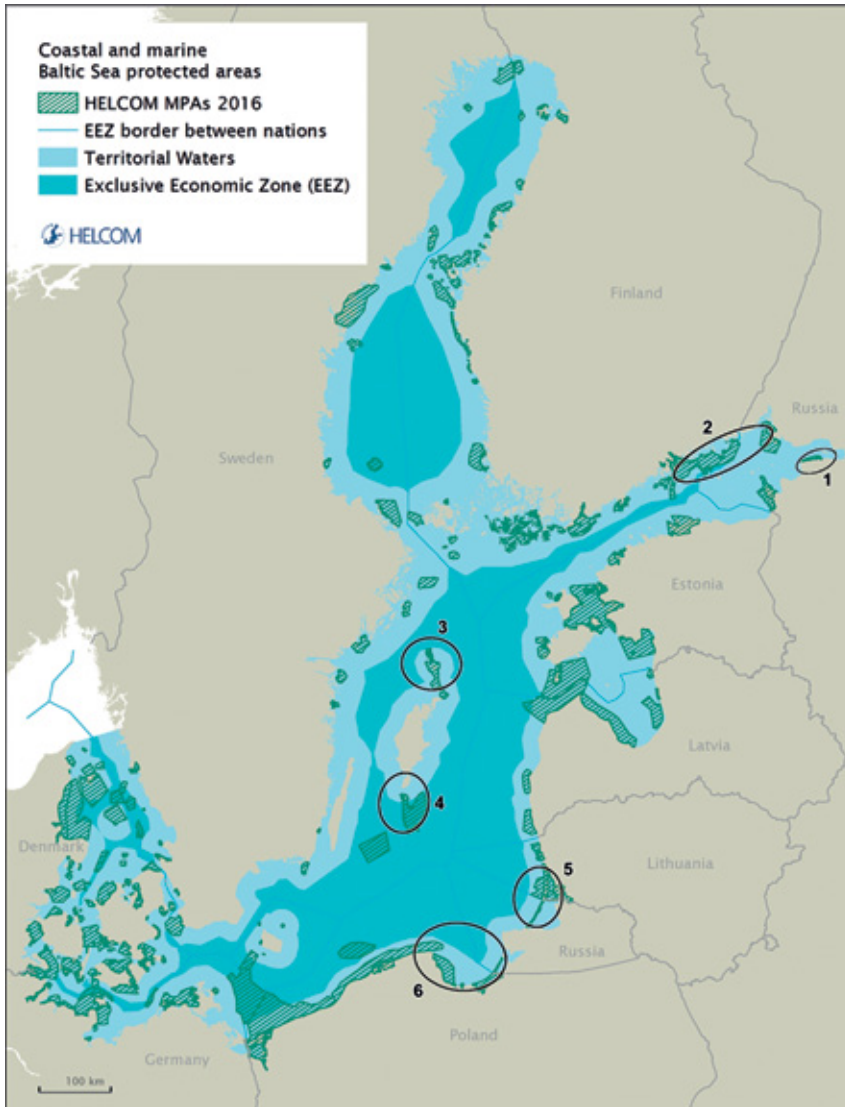


Рис. 3.105. Зоны экологического риска (чёрные овалы) в Балтийском море: 1 — юго-восточная часть Финского залива; 2 — северо-западная акватория Финского залива; 3 — северная часть Готландского бассейна; 4 — акватории южнее и восточнее о. Готланд; 5 — Куршская коса, Куршский залив; 6 — Хельская коса, Гданьский и Вислинский заливы. Зелёной штриховкой отмечены признанные HELCOM в 2016 г. [HELCOM, 2016c] морские охраняемые районы

Интересно отметить, что МОР покрывают только 0,65 % поверхности Мирового океана. В Балтийском море насчитывается несколько сотен национальных и международных МОР со следующим распределением между странами (в алфавитном порядке): Германия — 40, Дания — 167, Латвия — 7, Литва — 6, Польша — 9, Россия — 6, Финляндия — 33, Швеция — 489 и Эстония — 9 [World database]. В 1994 г., 212

в соответствии с Рекомендацией HELCOM 15/5 в Балтийском море было установлено 62 охраняемых природных территорий (The Baltic Sea Protected Areas — BSPAs). В 2008 г. их количество выросло до 90, а к 2012 г. база данных HELCOM включала уже список из 111 районов [HELCOM, 2012]. На сегодняшний день (конец 2016 г.) существует 174 МОР HELCOM (бывшие BSPAs), которые занимают около 12 % площади Балтийского моря (см. рис. 3.105) [HELCOM, 2016b]. Потребность в увеличении количества и площади МОР обусловлена тем фактом, что экосистемы и рыбные запасы находятся в уязвимых условиях в Балтийском море. Ситуация усугубляется в результате коммерческого рыболовства, эвтрофикации, химического загрязнения окружающей среды и регионального изменения климата [Kostianou et al., 2014b].

Международная морская организация определила Балтийское море как особо уязвимый морской район, что является признанием того, что море является особенно чувствительным и находится под угрозой, связанной с судоходством и морской деятельностью [Lindén et al., 2006], как было, в частности, показано нами в данной главе. Международная морская организация определяет особо уязвимый морской район как «область, которая нуждается в особой защите посредством действий со стороны международной морской организации в силу её значимости для признанных экологических, социально-экономических, или научных характеристик, и где такие характеристики могут быть уязвимы в результате международной судоходной деятельности». Объявление района, как особо уязвимый морской район означает, что страны региона должны договориться о принятии «соответствующих защитных мер», чтобы уменьшить риск экологического ущерба от международного судоходства [Linden et al., 2006]. К 2006 г. был согласован только один комплекс мер — схема разделения морских перевозок в центральной и юго-западной части Балтийского моря, что позволило несколько улучшить экологическую безопасность [Linden et al., 2006]. Совершенно очевидно, что ряд дополнительных мер может сделать судоходство в Балтийском море гораздо безопаснее и, следовательно, сделать более сохранной морскую среду и прибрежную зону.

В работах [Kostianou et al., 2007b, 2008, 2014b] была предложена методика количественной оценки рисков нефтяного загрязнения акватории, побережья и островов Балтийского моря на основе численного моделирования. В статье [Kostianou et al., 2014b] было сделано предложение о необходимости применения этой методики ко всем морским охраняемым районам и ключевым орнитологическим территориям в Балтийском море. Для каждого охраняемого района и любой части прибрежной зоны или островов, можно вычислить степень уязвимости с точки зрения вероятности загрязнения нефтью. Такая карта для всего Балтийского моря была бы очень полезной для национальных и международных природоохранных учреждений, организаций и научно-исследовательских институтов. Горячие точки на этой карте помогли бы выявить, определить местонахождение и точную форму новых МОР, которые должны быть организованы в ближайшее время для защиты окружающей среды Балтийского моря.

Но, как показывают полученные нами результаты, далеко не все признанные уже МОР не только не находятся под необходимой защитой, но и попадают в зону экологического риска.

Глава 4 ЧЁРНОЕ МОРЕ

4.1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЁРНОГО МОРЯ

Чёрное море расположено между $46^{\circ}33'$ – $40^{\circ}56'$ с. ш. и $27^{\circ}27'$ – $41^{\circ}42'$ в. д. Являясь частью бассейна Атлантического океана, Чёрное море соединяется с ним на юге через Средиземное море проливами Босфор, Дарданеллы и Гибралтар (рис. 4.1). На северо-востоке оно соединяется Керченским проливом с Азовским морем. Наибольшая длина моря по $42^{\circ}29'$ с. ш. составляет 1148 км. Наименьшая ширина его по меридиану южной оконечности Крымского полуострова (от м. Сарыч) 258 км [Доронин, 1986]. Площадь Чёрного моря составляет около 422 тыс. км², длина береговой линии 3400 км, средняя глубина 1240 м, максимальная глубина 2210 м, объём воды 537 тыс. км³ [Гидрометеорология..., 1991; Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].



Р и с. 4.1. Карта Чёрного моря и основных течений

В Чёрном море нет крупных островов. Самым значительным является о. Змеиный (1,5 км²), расположенный против дельты р. Дуная, в 35 км от берега. У входа в Березанский лиман лежит о. Березань, а у южного берега моря, в 92 км восточнее пролива Босфор, находится о. Кефкен. Эти острова меньше Змеинового. Несколько небольших островов находятся в Бургасском заливе. Кроме того, вблизи берегов, особенно южного берега Крымского полуострова и Анатолийского побережья, имеется несколько крупных подводных камней и скал, которые здесь часто называют островами [Гидрометеорология....., 1991; Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

Гидрологический режим Чёрного моря формируется под влиянием водообмена с Мраморным и Азовским морями, стока пресных вод с суши и климатических условий. Через пролив Босфор поверхностные воды Чёрного моря попадают в Мраморное море, а глубинные воды Мраморного моря вливаются в Чёрное море и заполняют его глубоководную часть. Через Керченский пролив из Азовского моря в Чёрное поступает большое количество пресной воды, а при южных ветрах воды из Чёрного моря поступают в Азовское. Материковый сток обуславливает значительное распреснение поверхностного слоя воды, особенно в прибрежных районах Чёрного моря [Гидрометеорология....., 1991; Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

В Чёрное море впадают следующие крупнейшие реки: Дунай, Днепр, Днестр, а также более мелкие Южный Буг, Мзымта, Псоу, Бзыбь, Риони, Кодор, Ингури и др. Годовой речной сток в Чёрное море составляет около 310 км³, причём 80 % этих вод выносятся на северо-западную шельфовую часть, в основном Дунаем и Днепром [Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

Существенное влияние на гидрологический режим оказывают климатические условия. Так, атмосферные осадки распресняют морскую воду, а сравнительно низкая температура воздуха зимой иногда обуславливает в северо-западной части моря образование ледяного покрова. В некоторые зимы лёд образуется и вдоль западного берега моря, на отдельных участках у Крымского полуострова и в крайней северо-восточной части моря.

Температура поверхностного слоя Чёрного моря в течение всего года имеет тенденцию роста в направлении с северо-запада на юго-восток, что определяется региональными климатическими особенностями. Открытая для вторжений с севера холодных воздушных масс северо-западная часть Чёрного моря характеризуется умеренным климатом, тогда как климат его восточной половины субтропический (в юго-восточной части — влажный субтропический) [Доронин, 1986].

Названные климатические различия особенно велики зимой. В феврале минимальная среднемесячная климатическая температура на северо-западе достигает 1–2 °С, тогда как на юго-востоке она составляет около 9 °С. Структура поля поверхностной температуры при этом такова, что вся северо-западная часть моря, по сути, представляет собой фронтальную зону с ростом температуры в юго-юго-восточном направлении на 5 °С на расстоянии 250 км. Язык вод с пониженной температурой (менее 7 °С) в центре западной части Чёрного моря, связан с адвекцией холодных вод с северо-западного склона по южной периферии западного циклонического круговорота. Другой язык холодных вод заметен вдоль юго-западного побережья моря до 32° в.д. Он связан с прибрежной ветвью циклонической циркуляции вод [Kostianoy, Kosarev, 2008].

Весной температурные контрасты в поверхностном слое существенно уменьшаются. Расположение максимумов на севере и юго-западе, а также на юго-востоке позволяет предположить их обусловленность паводковым речным стоком, распресняющим тонкий верхний слой, который быстро прогревается в указанных районах. Летом, в августе продолжается сглаживание температурных неоднородностей в процессе прогрева поверхностного слоя, довольно однородного по всей акватории моря. Осенью структура поля поверхностной температуры приближается к зимней как по размаху значений, так и по конфигурации изотерм. В северо-западной части идёт формирование области наиболее холодных вод с фронтальным сгущением изолиний. Вдоль Кавказского и Крымского берегов заметна циклоническая адвекция относительно тёплых вод. На изменение температуры воды в прибрежных районах большое влияние оказывают сгонно-нагонные явления и возникновение прибрежного апвеллинга. Так, у берегов Крымского полуострова и у восточного берега моря летом отмечались случаи, когда после сильного сгона или в результате апвеллинга температура поверхностного слоя моря понижалась с 25 до 7 °С [Доронин, 1986; Kostianou, Kosarev, 2008].

В поверхностном слое распределение солёности Чёрного моря во все сезоны года определяется влиянием основных источников опреснения (речной сток, в меньшей степени атмосферные осадки). В соответствии с циклоническим характером общей циркуляции вод из приустьевых районов крупных рек распространяются «шлейфы» вод пониженной солёности: из северо-западной части вдоль западного побережья на юг, из юго-восточной части — вдоль берегов Кавказа на север [Гидрометеорология..., 1991].

В феврале солёность поверхностного слоя имеет фоновый уровень значений, близкий к максимальному, несмотря на то, что зимний результирующий приток пресных вод в Чёрное море уступает лишь весеннему притоку (на 25%). Причина такого несоответствия — интенсивное конвективное перемешивание поверхностных вод с нижележащими более солёными водами. Особенно контрастное поле солёности в поверхностном слое формируется в мае. Под влиянием стока рек в половодье поверхностные воды в юго-восточной части моря опресняются до 15,5 г/кг, в северо-западной — до 10 г/кг и менее. Изогалина 17 г/кг оконтуривает более половины этих районов. Вместе с тем в центрах западной и восточной частей моря солёность продолжает оставаться почти такой же, как в феврале (лишь на 0,1 г/кг меньше) [Гидрометеорология..., 1991].

Уровень Чёрного моря изменяется в основном под влиянием сгонно-нагонных и сейшевых колебаний, а также стока речных вод. Сгонно-нагонные колебания уровня неодинаковы в разных районах моря и в разные сезоны. В мелководных частях моря, в заливах и бухтах сгоны и нагоны формируются под действием ветра, направленного перпендикулярно береговой линии. У приглубых берегов, наоборот, максимальные сгоны отмечаются при ветрах, дующих параллельно береговой линии.

В западном районе моря нагоны вызываются северо-восточными ветрами, а в северо-западном — юго-восточными ветрами. К наиболее сильным сгонам в этих районах моря приводят северо-западными ветрами. Особенно большие сгонно-нагонные колебания в западном и северо-западном районах Чёрного моря отмечаются в октябре-феврале. Их величина превышает 0,5 м, на мелководье достигает 1,5 м, а иногда и более. В редких случаях на Чёрном море наблюдаются штормовые нагоны до 4 м.

У Крымского побережья величина сгонно-нагонных колебаний редко превышает 0,2 м, однако в отдельных случаях отмечаются сгоны и нагоны до 0,4 м. У Кавказского побережья величина сгонно-нагонных колебаний обычно составляет 0,2–0,3 м. Здесь ветры одного и того же направления могут вызывать как сгоны, так и нагоны в зависимости от местных особенностей побережья [Гидрометеорология..., 1991].

Сейши являются весьма распространённой формой колебаний уровня на Чёрном море. Период сейш длится от нескольких минут до двух часов. Величина сейшевых колебаний уровня обычно 0,4–0,5 м, иногда до 1 м. Время существования сейш различно. Внезапно возникнув, они могут быстро затухать, но могут сохраняться в течение нескольких суток.

Сезонные колебания уровня Чёрного моря наиболее отчётливо выражены в районах влияния материкового стока; величина этих колебаний обычно не превышает 0,4 м. Понижение уровня наблюдается в октябре-ноябре (в некоторых районах — в январе-феврале), а повышение — в мае-июле.

Приливные колебания уровня Чёрного моря невелики, обычно не превышают 0,1 м.

В некоторых пунктах иногда наблюдаются своеобразные резонансные колебания воды (комбинация вертикальных и горизонтальных движений воды), известные под названием тягуна [Гидрометеорология..., 1991]. Тягун возникает, если период колебаний воды в порту или гавани близок к периоду длинных волн, подходящих к этому порту или гавани. В отдельных случаях тягун наблюдается при подходе к району порта или гавани длинной зыби; при этом море в районе самого порта или гавани относительно спокойно. При тягуне происходит наваливание судов на стенки набережных или на соседние суда или же, наоборот, резкий отжим судов от причалов, приводящий к обрыву швартовых.

Акватории Чёрного моря можно условно разделить на три зоны с резко различающимися режимами течений: зона прибрежной антициклонической завихренности течений (ПАЗ), центральная зона циклонической завихренности течений (ЦЗ) и разделяющая их зона стрежня Основного Черноморского течения (ОЧТ). На правой периферии ОЧТ между его стрежнем и шельфом в результате меандрирования ОЧТ и бокового сдвига скорости (максимальный горизонтальный градиент скорости может достигать 10–11 см/с на милю [Овчинников, Титов, 1990] формируется зона ПАЗ. Вся система меандров и вихрей движется вдоль берега в направлении основного потока ОЧТ со скоростью 3,7–5,5 км/сут, что создаёт в прибрежной зоне особый режим течений. Таким образом, горизонтальный водообмен между прибрежными и открытыми районами моря обусловлен наличием прибрежных антициклонических вихрей (ПАВ) и их взаимодействием с ОЧТ и друг с другом, которое выражается в трансформации ПАВ в вихри открытого моря [Гинзбург, 1994; Гинзбург и др., 2000, 2003; Зацепин и др., 2002].

Климат Чёрного моря, в связи с его среднеконтинентальным положением, в основном континентальный. Черноморское побережье Кавказа и южный берег Крыма защищены горами от холодных северных ветров и вследствие этого имеют мягкий средиземноморский климат, а к юго-востоку от Туапсе — влажный субтропический. Значительное влияние на погоду над Чёрным морем оказывает Атлантический океан, над которым зарождается большая часть циклонов, приносящих на море плохую погоду. На северо-восточном побережье моря, в районе Новороссийска, невысокие

горы не являются преградой для холодных северных воздушных масс, которые, пересаливаясь через них, обуславливают сильный холодный ветер («бора» или «норд-ост»). Юго-западными ветрами обычно в черноморский регион приносятся тёплые и достаточно влажные средиземноморские воздушные массы. В летнее время над морем находится отрог Азорского антициклона [Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

Для большей части акватории моря характерна тёплая влажная зима и жаркое сухое лето. Средняя температура января в северной части Чёрного моря $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, но в отдельные годы может опускаться и до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более. На территориях, прилегающих к Южному берегу Крыма и побережью Кавказа, зима гораздо мягче: температура редко опускается ниже $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Снег, тем не менее, периодически выпадает в северных районах моря. Средняя температура воздуха в июле на севере моря — $+23\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальные температуры не столь высоки благодаря смягчающему действию моря и обычно не превышают $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Самое тёплое место на побережье Чёрного моря — побережье Кавказа, в частности г. Гагра в Абхазии (среднегодовая температура $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$). Наибольшее количество осадков выпадает в районе Батуми (до 1500 мм в год), наименьшее — в северо-западной части моря (около 300 мм в год). Облачность за год в среднем составляет 60 % с максимумом зимой и минимумом летом [Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

Изменчивость основных направлений ветров над морем определяется сезонной изменчивостью распределения атмосферного давления. Зимой над морем преобладают северо-восточные, северные и северо-западные ветры, а в его юго-восточной части — восточные. Летом чаще всего дуют северо-западные, западные и юго-западные ветры. В холодное полугодие в западной части моря средняя скорость ветра достигает 7–8 м/с, а в прибрежной зоне — менее 7 м/с. В юго-восточной части моря скорость ветра составляет 5–6 м/с, в северо-восточной — 6–7 м/с. В тёплое время года средние скорости ветра на 1–1,5 м/с меньше, но они также увеличиваются с востока на запад. Наименьшая скорость ветра в течение всего года наблюдается у Южного берега Крыма и в юго-восточной части моря. Кроме того, в прибрежной зоне моря дуют бризы, обусловленные неодинаковым нагревом и остыванием поверхности суши и моря, днём — с моря на сушу, ночью — с суши на море. В Ялте отмечается до 190 дней с бризовой циркуляцией. Бриз может проникать на сушу или в сторону моря на расстояние до 30 км [Гидрометеорология....., 1991; Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

Усиление ветра над морем обусловлено чаще всего прохождением атмосферных циклонов. Число дней в году с сильным ветром (более 15 м/с) составляет около 35–40, больше всего таких дней на северо-восточном и северо-западном побережье моря. Самый сильный ветер на море — новороссийская бора (или норд-ост), которая ежегодно наблюдается по нескольку раз в осенне-зимние месяцы (40–50 дней). Скорость северо-восточного ветра достигает 40 м/с, а при порывах — 80 м/с. Бора часто сопровождается понижением температуры на 5–10 $^{\circ}\text{C}$. Её продолжительность составляет от 1–3 сут до недели. Появление боры ограничено участком от Анапы до Туапсе, реже она наблюдается на южном берегу Крыма [Гидрометеорология....., 1991; Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

В северо-восточной части моря ежегодно бывает по нескольку случаев возникновения смерчей. Выход их на берег иногда сопровождается катастрофическими по-

следствиями. Например, в июне 1991 г. серьёзно пострадали жители г. Туапсе, а в августе 2002 г. — г. Новороссийск и его пригороды. Были повреждены дома, линии электропередач, автомагистрали и железная дорога, разрушены несколько поселков вокруг. Десятки людей погибли и пропали без вести.

Режим ветрового волнения моря изучен недостаточно, поскольку регулярных инструментальных наблюдений за волнением в открытой части моря практически не проводилось. Основные характеристики волнения определялись расчётами, по которым средняя высота волн составляла 0,5–1 м, а максимальная (в зимний сезон) — 7 м. Однако 14 ноября 1854 г. во время Крымской войны в районе Балаклавы из-за сильнейшего шторма погибла объединённая англо-французская эскадра: затонуло 34 военных корабля, потери составили 1500 человек. Впоследствии такого типа экстремальные штормы проносились над морем в конце октября 1969, в ноябре 1981 и 1992 гг. Во время шторма 1981 г. в районе м. Тарханкут (западная оконечность Крыма) ударами волн был снесён настил нефтегазодобывающей платформы на высоте 14 м над уровнем моря. Максимальная высота волн в открытой части моря могла достигать 16–17 м.

В Чёрном море по сведениям различных источников, за последние 2000 лет отмечено 26 случаев цунами, большая часть которых была связана с землетрясениями. Некоторые из них: Диоскурия (на месте современного Сухуми, I в. до н. э.), Севастополь (109), Варна (543), Босфор (557), Евпатория (1341), Форос (1427), Турция (1598, 1939 гг.), Крым (1869, 1875, 1902, 1908, 1919, 1927, 1941 гг.), Анапа (1905, 1966 г.) — сопровождалась волнами цунами высотой 1–3 м и не приводили к катастрофическим последствиям (за исключением разрушения Диоскурии).

Море омывает берега России, Украины, Румынии, Болгарии, Турции, Грузии и Абхазии. Это важный район транспортных перевозок, а также один из крупнейших курортных регионов Восточной Европы и России. Помимо этого, Чёрное море имеет чрезвычайно важное стратегическое и военное значение для России. В Севастополе и Новороссийске находятся основные военные базы российского Черноморского флота [Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

В транспортном отношении существенный объём морских перевозок осуществляют танкеры, обеспечивающие экспорт нефти и нефтепродуктов из Новороссийска и Туапсе. Нефте терминалы Новороссийска способны принимать супертанкеры, однако объёмы экспорта нефти существенно сдерживаются ограниченной пропускной способностью проливов Босфор и Дарданеллы. В этой связи существует проект строительства нефтепровода Бургас-Александрополис с поставкой нефти танкерами из Новороссийска. По дну Чёрного моря проложен глубоководный газопровод «Голубой поток», соединяющий Россию и Турцию и газопровод «Джубга-Лазаревское-Сочи». Существуют планы расширения мощности газопровода «Голубой поток» путём прокладки дополнительной ветви трубы, а также строительства нового подводного газопровода «Турецкий поток». В начале XXI века больше половины перевозок по Азово-Черноморскому бассейну приходилось на внешнюю торговлю. Помимо занимающих основное место нефти и нефтепродуктов вывозятся руды, металл, лес, цемент, зерно и другие товары. Широко развиты контейнерные перевозки. Морские пассажирские перевозки вдоль побережья России практически не осуществляются. Наиболее крупным портом РФ на Чёрном море по грузообороту является Новороссийск [Гриневецкий и др., 2015; Grinevetskiy et al., 2015].

В последнее время источником повышенного интереса стали новые данные о строении и составе осадочных бассейнов глубоководной части Чёрного моря, которые могут являться признаками нефтегазоносности осадочного чехла: газо-, нефте- и гидратопроявления, развитие грязевых вулканов, повышенные концентрации метана в осадках и придонной воде и др.

Первое сообщение об обнаружении струйных газовыделений в открытых районах Чёрного моря было сделано в 1989 г. [Поликарпов и др., 1989]. Множество исследований, предпринятых вслед за этим событием, показали, что явление струйных газовыделений широко распространено во всём диапазоне глубин Чёрного моря. Струйные газовыделения и грязевые вулканы связывают с процессами вертикальной миграции через слои донных осадков газообразных, а также растворенных форм углеводородных соединений [Judd, Novland, 2007]. Согласно опубликованным результатам серий натуральных экспериментов, проводившихся с 1993 г по настоящее время, в Чёрном море обнаружены струйные газовыделения и холодные метановые сипы по периметру свала глубин и в глубоководной части [Круглякова и др., 2009], а также районы локализации глубоководных грязевых вулканов [Иванов и др., 1989].

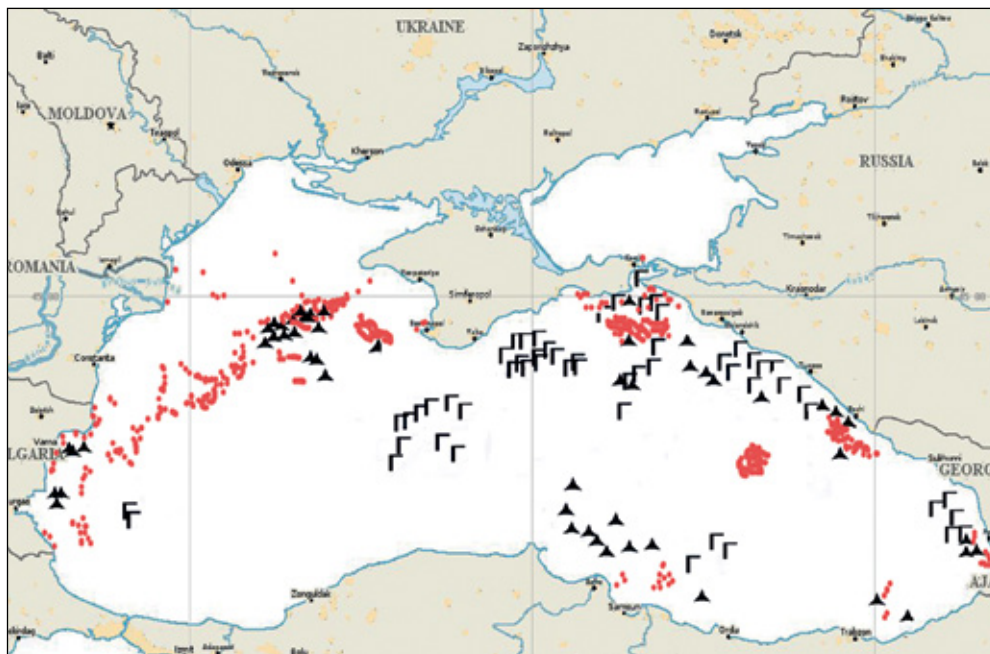
Районами наиболее интенсивных проявлений разгрузки углеводородных газов из недр в толщу воды являются:

- шельф Болгарии (свыше 480 выходов газа на дне моря);
- шельф Украины в северо-западных частях Чёрного моря (около 200);
- Керченско-Таманский шельф;
- шельф России по всей площади Сочи-Адлерской депрессии;
- грузинский шельф и континентальный склон;
- турецкий шельф в прибрежной зоне восточных Понтидов в районе Ризе;
- глубоководная часть; свыше 60 грязевых вулканов задокументировано к настоящему времени в Чёрном море, преимущественно, в центральной его части и в прогибе Сорокина на глубинах свыше 1500 м [Шнюков, Клещенко, 2001].

На рис. 4.2 приведена обобщённая карта-схема различных видов газопроявлений (газовые выходы, грязевые вулканы), составленная по литературным данным [Круглякова и др., 2009, Егоров и др., 2011].

Выходы струйных метановых газовыделений из грязевых вулканов и метановых сипов могут проявляться на морской поверхности за счёт различных механизмов. Вместе с пузырьками углеводородных газов, поднимающихся из недр на морскую поверхность, могут выноситься как скопления морских микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности, так и капли нефти. Отдельного внимания заслуживают выходы жидкой нефти на поверхность морского дна в районах развития грязевого вулканизма. На данный момент нефтепроявления обнаружены в пределах Туапсинского прогиба — грязевые вулканы Нефтяной и Манганари; Гурийского прогиба — горы Иберия и Печори, нефтяной сип Колхети и нефтяной сип Ризе [Шнюков и др., 2001].

Традиционные контактные и визуальные способы изучения естественных выходов углеводородов на морском дне с использованием водолазного снаряжения, подводных аппаратов и телевизионных комплексов предоставляют ограниченные возможности охвата наблюдениями лишь отдельных объектов в пределах доступных глубин. Данные, получаемые в результате таких исследований, часто оказываются фрагментарными.



Р и с. 4.2. Карта-схема распределения метановых газовыделений в Чёрном море. Красные точки — задокументированные метановые выделения; чёрные треугольники — выходы нефти и газа на поверхность; Г— грязевые вулканы

Представляется, что большим потенциалом для картирования очагов естественных выходов углеводородов с морского дна, как в шельфовых, так и в глубоководных зонах, обладают методы спутникового дистанционного зондирования, позволяющие проводить регулярные наблюдения с высоким пространственным разрешением и на больших акваториях.

Промысловое значение в Чёрном море имеют следующие виды рыб: килька, кефаль, анчоус (хамса), скумбрия, ставрида, судак, лещ, осетровые, сельди. В последние годы XX — начале XXI века рыбный промысел значительно сократился вследствие вселения мнемнописца, перелова рыбы и ухудшения экологического состояния моря.

Благоприятные климатические условия в Причерноморье обуславливают его развитие как важного курортного региона. К крупнейшим курортным районам РФ на Чёрном море относятся Анапа, Геленджик, Сочи, а также многочисленные курорты Крыма. Черноморское побережье Кавказа является основным курортным регионом Российской Федерации. В 2005 г. его посетили около 9 млн туристов; в настоящее время эта цифра выросла до 10–12 млн человек. На российском побережье Чёрного моря насчитывается свыше 1000 пансионатов, санаториев и отелей, и их число постоянно растёт. Развитие курортной индустрии на Черноморском побережье сдерживается относительно коротким (по сравнению со Средиземным морем) курортным сезоном, экологическими, транспортными и финансовыми проблемами [Гриневецкий и др., 2015; Grinevetkiy et al., 2015].

4.2. НЕФТЯНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Авторы монографии имеют многолетний опыт работ по спутниковому мониторингу Чёрного моря, включающий в себя три этапа.

С 1999 по 2005 г. (в летний период) проводились спутниковые радиолокационные наблюдения прибрежной зоны Чёрного моря в районе Новороссийск — Геленджик [Булатов и др., 2003а; Литовченко и др., 2007].

В 2006—2007 гг. (с апреля по октябрь) совместно со специалистами из НИЦ «Планета» Росгидромета и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводились работы по спутниковому мониторингу загрязнений (береговых, судовых и биогенных) водной среды российского сектора Азово-Черноморского бассейна. В ходе выполнения этих работ применялась технология спутникового мониторинга состояния и загрязнения водной среды по данным микроволнового, видимого и инфракрасного диапазонов [Бедрицкий и др., 2007, 2009; Shcherbak et al., 2008].

С начала 2009 г. по настоящее время проводится круглогодичный спутниковый многосенсорный мониторинг всей акватории Чёрного моря [Лаврова, Митягина, 2012; Лаврова и др., 2010, 2011а; Митягина и др., 2015; Mityagina, Lavrova, 2015а, 2016]. На данных этого мониторинга базируются многие результаты, полученные в ходе выполнения проекта Российского научного фонда (РНФ) № 14-17-00555 «Исследование влияния динамических и циркуляционных процессов на распространение антропогенных и биогенных загрязнений морской поверхности на основе комплексного использования спутниковой информации», который выполнялся в 2014—2016 гг.

Одним из основных параметров загрязнения морской поверхности, на выявление и оценку которого было направлено наше внимание, является загрязнение морской поверхности нефтесодержащими плёнками. В ходе выполнения мониторинга состояния и загрязнения поверхности акватории Чёрного моря на основе спутниковых данных выявлялись нефтесодержащие плёночные загрязнения обусловленные:

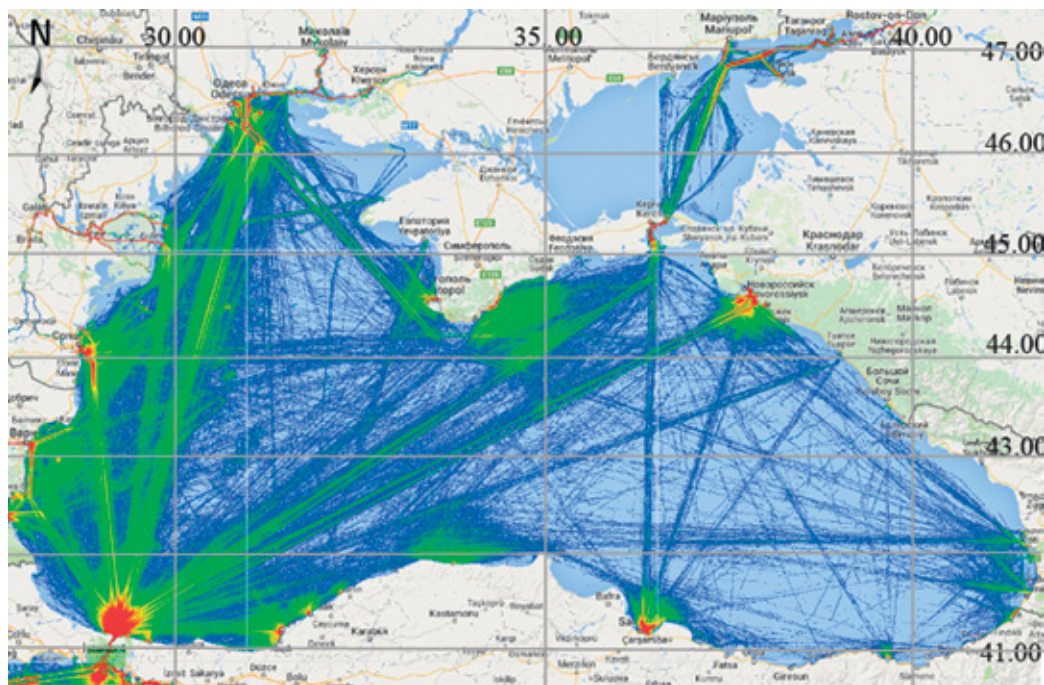
- сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты — основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются нефтесодержащие промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых насосов;
- грязевым вулканизмом и естественными выходами углеводородов (метановые сипы), которые обнаруживаются в Чёрном море практически повсеместно.

Экспериментальной основой спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени загрязнённости, служили данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленные на искусственных спутниках Земли Европейского космического агентства ERS-2 (до 2011 г.) и Envisat (до 2012 г.), Sentinel-1A (начиная с октября 2014 г.) и Sentinel-1B (начиная с сентября 2016 г.). Кроме того, для интерпретации РЛИ привлекались данные сенсоров MODIS ИСЗ Aqua/Terra, MERIS ИСЗ Envisat видимого и инфракрасного диапазонов, несущие информацию о полях температуры поверхности моря и мезомасштабной динамике вод. Дополнительно использовались данные сканирующих радиометров OLI ИСЗ Landsat-8, ETM+ ИСЗ Landsat-7 и TM ИСЗ Landsat-5, в последнее время к интерпретации стали привлекаться данные недавно введённого в эксплуатацию сенсора оптического диапазона MSI ИСЗ Sentinel-2A.

4.2.1. Нефтяные загрязнения в результате судовых сбросов

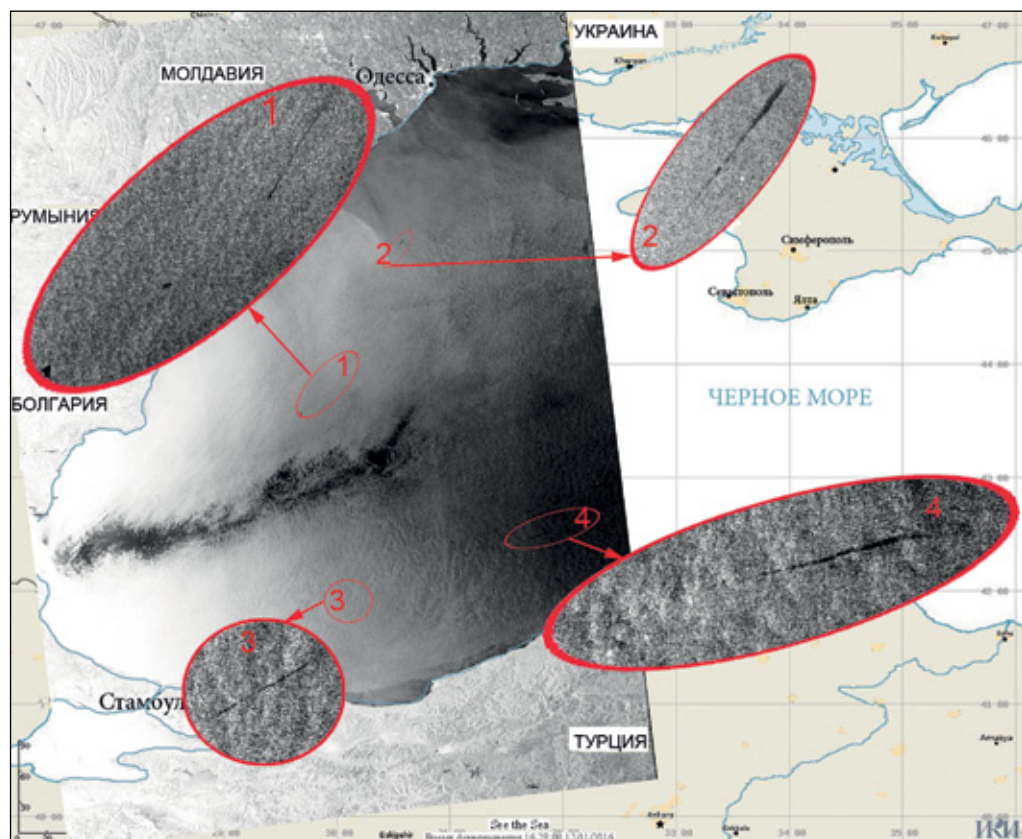
Для экономики Черноморских государств велико транспортное значение Чёрного моря. Через Чёрное море проходит международный транспортный коридор TRACECA (Transport Corridor Europe – Caucasus – Asia). Черноморские порты являются также конечными пунктами ряда пан-европейских транспортных коридоров. Существенный объём морских перевозок составляют рейсы танкеров, обеспечивающих экспорт нефти и нефтепродуктов из портов России (в первую очередь из Новороссийска и Туапсе) и портов Грузии. Интенсивность судоходства в Чёрном море отражена на карте, представленной на рис. 4.3. Цветовым кодированием на карте отражена плотность транспортной нагрузки, рассчитанная как среднее количество различных судов, ежедневно определяемых в ячейке размером 1×1 км в июне 2013 г.: синий цвет — менее 30; зелёный — от 30 до 70; жёлтый — от 71 до 140; красный — более 140 (<https://help.marinetraffic.com/hc/en-us/articles/204802167-Display-Density-Maps>).

Спутниковый мониторинг является эффективным методом контроля морской среды и позволяет ежедневно отслеживать появление нефтяных загрязнений на обширной акватории одновременно, включая территориальные воды сопредельных стран, что особенно важно в случае трансграничного переноса загрязнений течениями.



Р и с. 4.3. Карта интенсивности судоходства в Чёрном море в июне 2013 г. Источник — Marine Vessel Traffic: <http://www.marinevesseltraffic.com/2013/06/black-sea-marine-traffic.html>

Подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных в ходе спутникового мониторинга Чёрного моря, представляют собой утечки и сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты. В качестве иллюстрации на рис. 4.4 приведено РЛИ, полученное сенсором ASAR Envisat над западной частью Чёрного моря 17 марта 2010 г. На одном спутниковом изображении идентифицируется по меньшей мере шесть случаев загрязнения морской поверхности нефтесодержащими плёнками, произошедших в результате сбросов с движущихся по трассе судов. Увеличенные фрагменты, представляющие идентифицированные загрязнения, вынесены стрелками в круги и овалы и отмечены цифрами. На первом примере видны три небольших по площади загрязнения. Одно из них представляет собой пример «идеального» свежего сброса и проявляется в виде узкой прямолинейной полосы понижения сигнала протяжённостью 19,5 км, повторяющей маршрут движения корабля. Сброс, видимо, происходил во время радиолокационной съёмки и непосредственно перед ней, растекание плёнки ещё в самом начале. Яркая белая точка на северо-восточном конце полосы показывает текущее положение судна — виновника сброса, направляющегося в порт г. Одессы.



Р и с. 4.4. ASAR Envisat изображение от 17.03.2010 г. и выявленные на нём загрязнения морской поверхности в результате судовых сбросов

Два других загрязнения также расположены на судоходной трассе, ведущей из залива Босфор к порту Одессы, и представляют собой небольшие пятна с размерами 0,7 и 0,4 км², являющиеся, скорее всего, результатом утечки льяльных вод с проходивших по трассе кораблей.

На втором примере выделяется высококонтрастная полоса нефтесодержащего загрязнения за судном, следующим из порта Одессы по направлению к Стамбулу. Протяжённость загрязнения составляет около 20 км. Этот сброс был произведён за некоторое время до момента радиолокационной съёмки и характеризуется большей площадью растекания плёнки: при удалении от судна заметно расширение полосы загрязнения под воздействием ветра и волнения до 600 м. Площадь загрязнения составляет около 4 км².

Третий и четвёртый примеры отображают загрязнения морской поверхности сбросами, произведёнными судами, движущимися по трассе Стамбул – Керченский пролив. На третьем примере выделяется узкий свежий сброс длиной 12,5 км за судном, движущимся в северо-восточном направлении, по направлению к Новороссийску и/или к Керченскому проливу. Направление движения позволяет определить яркая точка в начале сброса, соответствующая положению судна. Виновником загрязнения, представленного на четвёртом примере, является судно, направляющееся по той же трассе, но в юго-западном направлении, в сторону Стамбула. О направлении движения этого судна свидетельствует заметное сужение полосы загрязнения к юго-западу, в сторону её более свежей части. Загрязнение имеет протяжённость около 20 км, его площадь составляет около 2 км².

В зависимости от места локализации нефтяные загрязнения, выявленные в Чёрном море по результатам анализа спутниковых данных, подразделяются на три основных типа: 1) загрязнения в проливах и на участках акватории вблизи входа в проливы; 2) загрязнения на якорных стоянках; 3) загрязнения вдоль основных судоходных трасс в открытой части моря. Каждому из этих типов загрязнений присущи свои характерные особенности.

Нефтяные загрязнения в проливах и на участках акватории вблизи входа в проливы. По степени изолированности от океана Чёрное море уступает только Азовскому. На юго-западе оно сообщается с Мраморным морем через пролив Босфор, который, фактически, является узким каналом длиной 31 км, шириной от 3,7 до 0,7 км и минимальной глубиной 50 м. На севере Чёрное море соединено с Азовским узким и мелководным Керченским проливом, имеющим длину около 45 км, ширину, меняющуюся от 4,5 до 15 км, и глубину 7–18 м.

Через пролив Босфор в 2015 г. прошло в общей сложности 43 544 корабля, 21 713 из них проследовали в северном направлении — в Чёрное море, и 21 831 — в южном (<http://www.bosphorusstrait.com/2016/09/20/yearly-ship-statistics-of-bosphorus-strait-2015/>). Из общего количества 5836 судов являлись нефтеналивными танкерами, то есть каждый день через центральную часть Стамбула, в котором проживает 14 млн человек, проходило в среднем до 16 крупнотоннажных танкеров. Пролив Босфор перегружен, и, несмотря на то, что система управления движением в нем считается одной из самых совершенных в мире, для его прохождения судам приходится несколько дней ожидать своей очереди на якорной стоянке. Вполне естественно, что спутниковым наблюдениям части акватории Чёрного моря, прилегающей к проливу

Босфор, должно уделяться повышенное внимание как зоне с повышенной вероятностью возникновения экологических рисков. Следует отметить, что факт выявления на спутниковых изображениях нефтяных загрязнений в районе Босфорского пролива является, к счастью, относительно редким событием. Нефтяное загрязнение морской поверхности в этом районе обусловлено в основном сбросом нефтесодержащих вод с неподвижных судов, ожидающих своей очереди на якорной стоянке. Подавляющее большинство выявленных пятен поверхностных нефтесодержащих плёнок имеют относительно небольшие размеры, не превышающие по площади 1 км^2 . Однако иногда под влиянием ветра и волнения нефтяная плёнка растекается и покрывает большую площадь. Скорее всего, подобная относительно благополучная ситуация является следствием усиленного контроля международных организаций стран черноморского региона за экологическим состоянием пролива. Пример выявления на спутниковом РЛИ нефтесодержащих загрязнений морской поверхности вблизи входа в Босфорский пролив представлен на рис. 4.5.

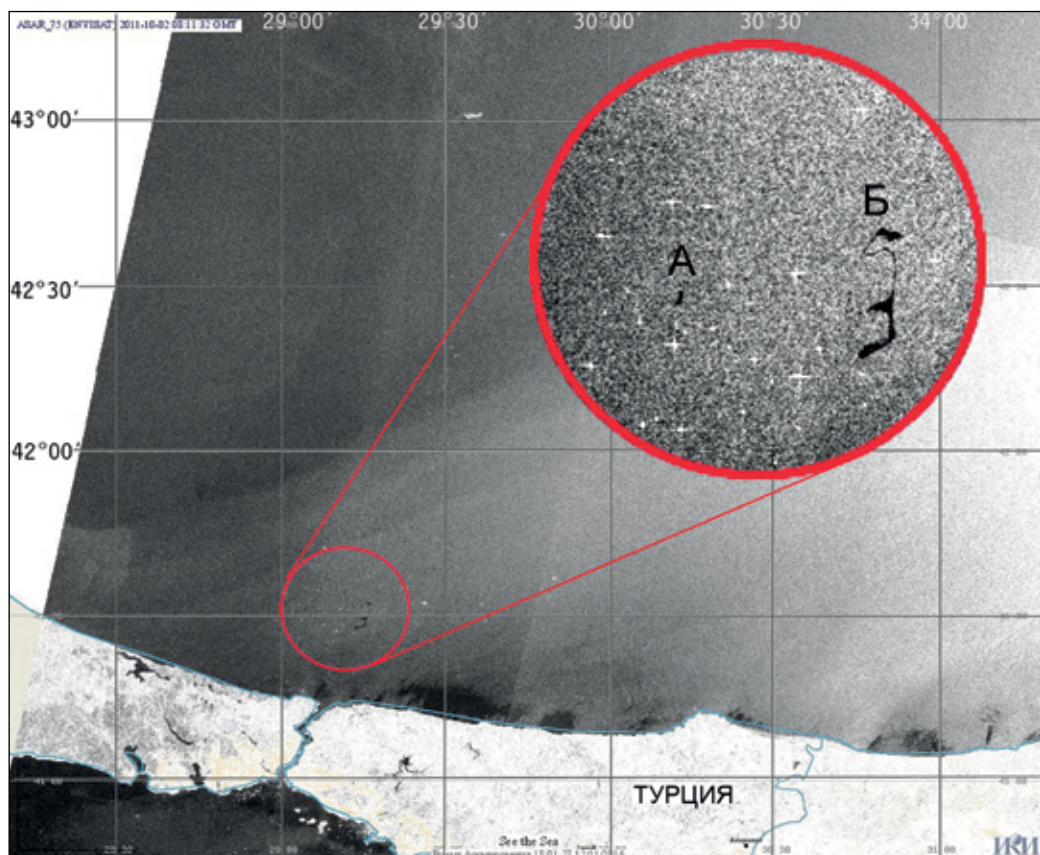


Рис. 4.5. РЛИ ASAR Envisat от 02.10.2011 г., 08:11 UTC. Нефтяное загрязнение у входа в Босфор. Площадь пятна А — $0,3 \text{ км}^2$, площадь пятна Б — $3,2 \text{ км}^2$

Керченский пролив также является крупной транспортной артерией. На его берегах действуют несколько крупных портовых комплексов. Из-за мелководности пролива невозможно использовать суда с большой осадкой, поэтому в основном по проливу проводятся суда типа «река-море». На якорной стоянке вблизи черноморского устья грузы переваливаются на крупнотоннажные суда. В открытом море на рейде проходит перекачка нефти и перевалка сыпучих грузов (сера, сода, фосфор, уголь, зерно) с одного корабля на другой, причём перевалка часто осуществляется на судно-накопитель одновременно с двух речных судов на оба борта, хотя это запрещено правилами.

Согласно данным службы системы управления движения судов (СУДС) Керченского пролива (http://www.rosmorport.ru/nvr_serv_nav.html) в 2013, 2014 и 2015 гг. через него прошло 11 353, 10 952 и 9969 судов соответственно. А всего за эти годы находилось в зоне действия СУДС Керченского пролива, а также осуществляли входы/выходы в морские порты Кавказ, Темрюк и Тамань 59 536, 86 957 и 100 524 судов соответственно. Столь существенное увеличение количества судов связано, по всей видимости, с работами по строительству моста через пролив. Наличие столь высокой транспортной активности вызывает необходимость причислить район Керченского пролива к зонам повышенных экологических рисков. Согласно нашим наблюдениям, судоходство в проливе иногда сопровождается несанкционированными сбросами грязных балластных вод, содержащих нефтепродукты. На спутниковых радиолокационных изображениях Керченского пролива и прилегающей к нему части акватории Чёрного моря регулярно выявляются тёмные пятна пониженного рассеяния, обусловленные присутствием на морской поверхности нефтесодержащих плёночных загрязнений. Типичный пример приведён на рис. 4.6.

На радиолокационном изображении, полученном SAR Sentinel-1A над Керченским проливом и прилегающим к нему участком акватории Чёрного моря, отчётливо выделяются два пятна пониженного рассеяния. Пятно, помеченное буквой «А», находится на судоходной трассе в центре пролива и обусловлено сбросом вод, загрязнённых нефтепродуктами, с проходящего судна. Очевидно, разлив произошёл за несколько часов до проведения радиолокационной съёмки. Пятно площадью 0,8 км² отличается большой степенью растекания плёнки и под воздействием ветра и волнения приобрело характерный вид «гребёнки». Пятно, помеченное буквой «Б», площадью 0,12 км² выявлено в акватории порта Тамань, в непосредственной близости от терминала по перегрузке масложирового сырья (ООО «Пищевые ингредиенты»). Этот терминал, в частности, принимает танкеры с грузом пальмового масла. С высокой степенью вероятности можно предположить, что пятно «Б» является плёночным загрязнением морской поверхности, обусловленным разливом органических масел в ходе погрузочно-разгрузочных работ. Следует отметить, что на спутниковых изображениях достаточно часто выявляются плёночные загрязнения вблизи терминалов порта Тамань, обусловленные, скорее всего, присутствием нефтепродуктов, а также растительных и синтетических масел, попадающих на морскую поверхность в результате технологических операций.

К числу источников загрязнения акватории Керченского пролива можно отнести также поступление сточных вод с судов и портовых сооружений; сброс мусора и балластных вод судами, разливы при бункеровке и аварийные разливы нефти; а также разлив и просыпание грузов при перегрузочных операциях.

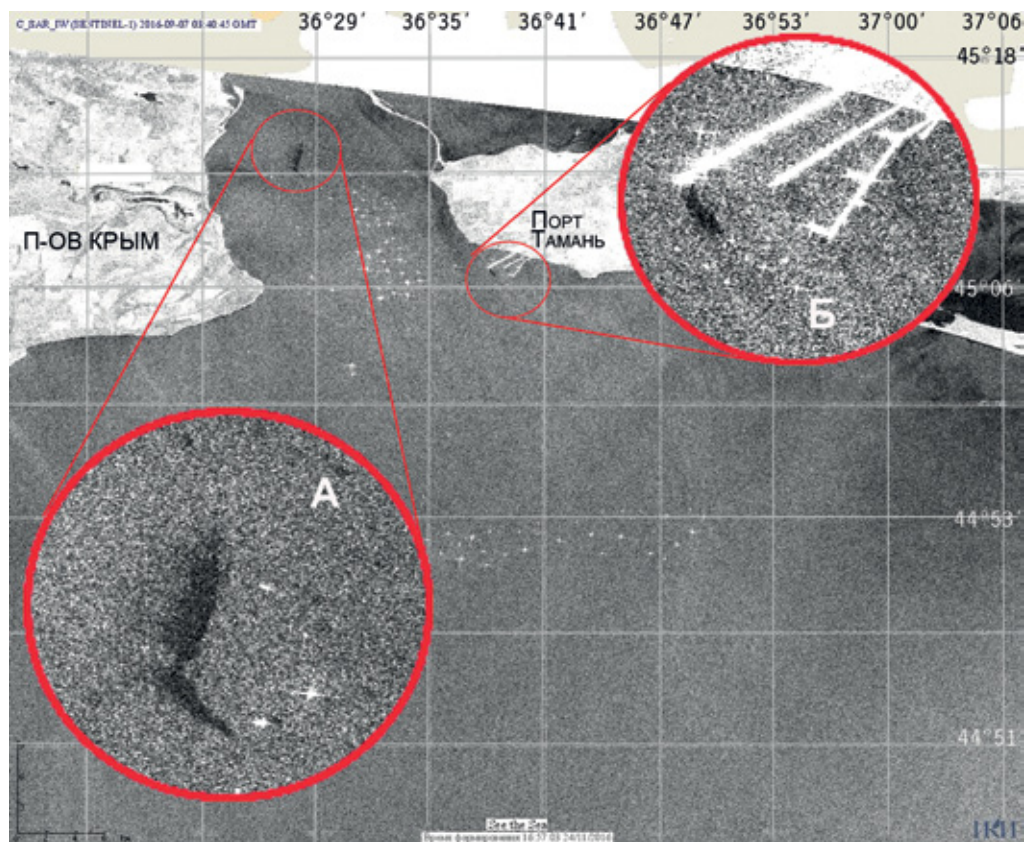


Рис. 4.6. РЛИ SAR Sentinel-1A от 07.09.2016 г., 03:40 UTC.
Нефтяные загрязнения в Керченском проливе

Загрязнения на якорных стоянках. Загрязнения морской поверхности, выявленные на спутниковых изображениях в районах якорных стоянок вблизи крупных портов, имеют много общих признаков с загрязнениями, выявляемыми на участках акватории вблизи входа в проливы. Находясь на якорных стоянках, суда ожидают подхода к причалу, а также производят погрузочно-разгрузочные работы, принимают топливо, воду, иногда ремонтируются. Практика показывает, что в ходе ненадлежащего исполнения правил при производстве этих работ, а также в тех случаях, когда не выполняются предусмотренные правилами МАРПОЛ-73/78 (<http://docs.cntd.ru/document/901764502>) условия сброса нефтесодержащих льяльных вод, происходит загрязнение акватории в районе якорной стоянки нефтепродуктами. Как упоминалось в разд. 2.4, при сбросе с неподвижного судна на якорной стоянке, в отсутствие ветра и волнения, растекание нефти происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму. Однако наличие ветра и волнения может оказать существенное влияние на структуру пятна. В некоторых случаях пятно может вытянуться в линию так, как будто сброс произошёл с движущегося судна. Для иллюстрации на рис. 4.7 и 4.8. приведены примеры загрязнения морской

поверхности сбросами с судов на якорных стоянках. На рис. 4.7 изображён фрагмент РЛИ ASAR Envisat, полученного 2 сентября 2011 г. над северо-западной частью акватории Чёрного моря. На нем выделяется скопление ярких точек, соответствующее судам, находящимся на якорной стоянке на некотором удалении от порта г. Одесса. В зоне скопления судов отчётливо выделяется пятно загрязнения нефтесодержащими плёнками, первоначально округлой формы, постепенно растекающееся в западном направлении. Площадь пятна составляет $2,3 \text{ км}^2$. Западнее этого загрязнения, также в районе якорной стоянке, на РЛИ выявляется ещё одно пятно, но уже существенно меньшей площади ($0,3 \text{ км}^2$).

На рис. 4.8 приведён фрагмент РЛИ SAR Sentinel-1A, полученного 28 апреля 2016 г. над северо-восточной частью акватории Чёрного моря. В акватории порта Новороссийска в районе якорной стоянки между м. Дооб и г. Геленджик выявлено округлое пятно плёночного загрязнения морской поверхности, площадью $0,12 \text{ км}^2$, обусловленное, по всей видимости, сбросом нефтесодержащих вод с находящегося на стоянке судна.

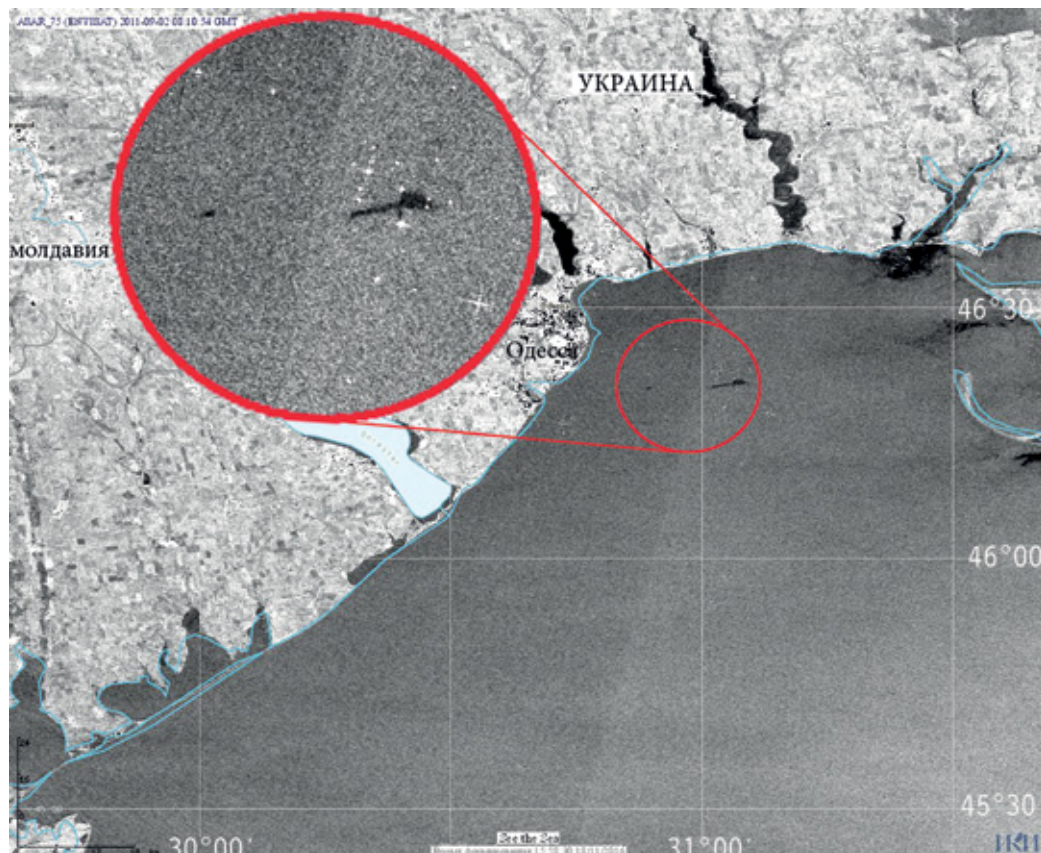
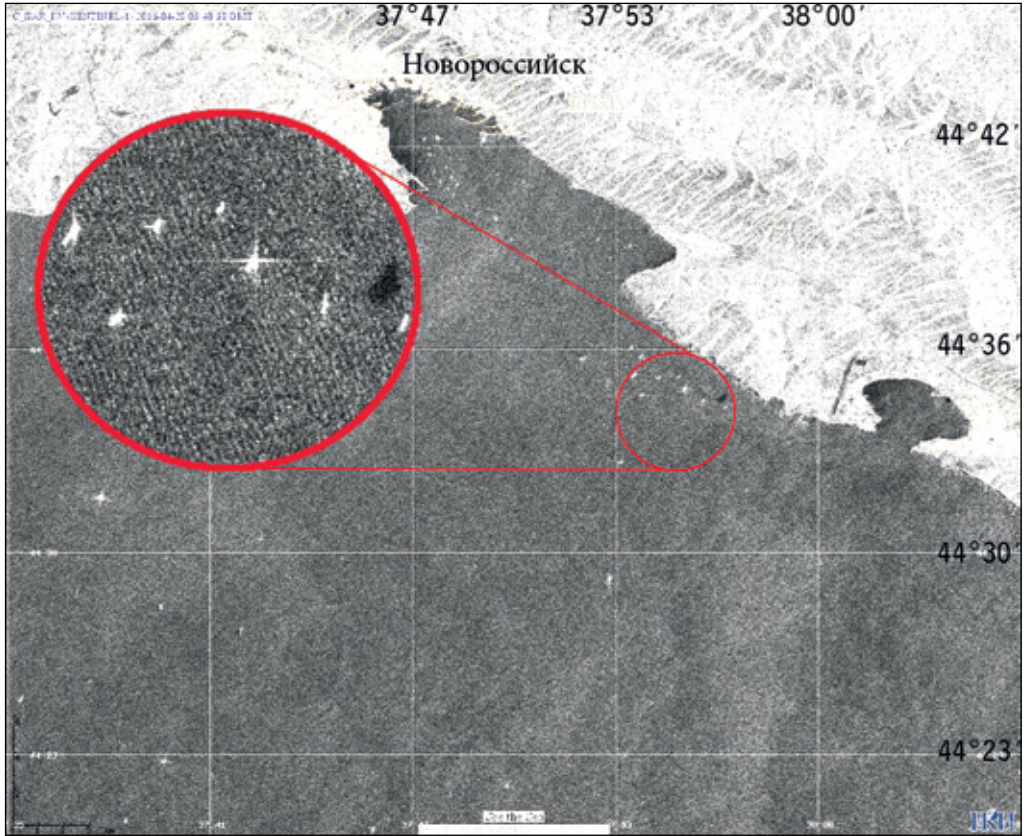


Рис. 4.7. РЛИ ASAR Envisat от 02.09.2011 г., 08:10 UTC.
Нефтяные загрязнения на якорной стоянке порта Одесса



Р и с. 4.8. РЛИ SAR Sentinel-1A от 28.04.2016 г., 03:40 UTC.
Нефтяные загрязнения на якорной стоянке порта Новоросийск

Нефтяные загрязнения морской поверхности в результате судовых сбросов вдоль основных судоходных трасс являются наиболее многочисленными и зачастую отличаются большими размерами. Хорошей иллюстрацией может служить случай крупного нефтяного загрязнения, выявленного 17 июля 2011 г. в центральной части моря, представленный на рис. 4.9. На РЛИ отчётливо выделяется прерывистая полоса протяжённостью 46,8 км, отличающаяся большим контрастом с окружающим фоном и значительной степенью растекания плёнки: ширина полосы достигает местами 1,2 км. Разлив, очевидно, произошёл несколькими часами раньше, и судно-виновника установить невозможно. Сужение полосы к северо-востоку позволяет предположить, что судно следовало в направлении Севастополя. Сброс, очевидно, осуществлялся в несколько этапов, общая площадь загрязнения на момент проведения радиолокационной съёмки составляет примерно 40 км².

Как показывают наши наблюдения, суда достаточно часто производят многократные сбросы загрязнённых вод в движении. На рис. 4.10 представлен ещё один такой пример. На РЛИ, полученном 23 июня 2011 г. над восточной частью Чёрного моря, выделяется чёткий прерывистый след протяжённостью 124 км.

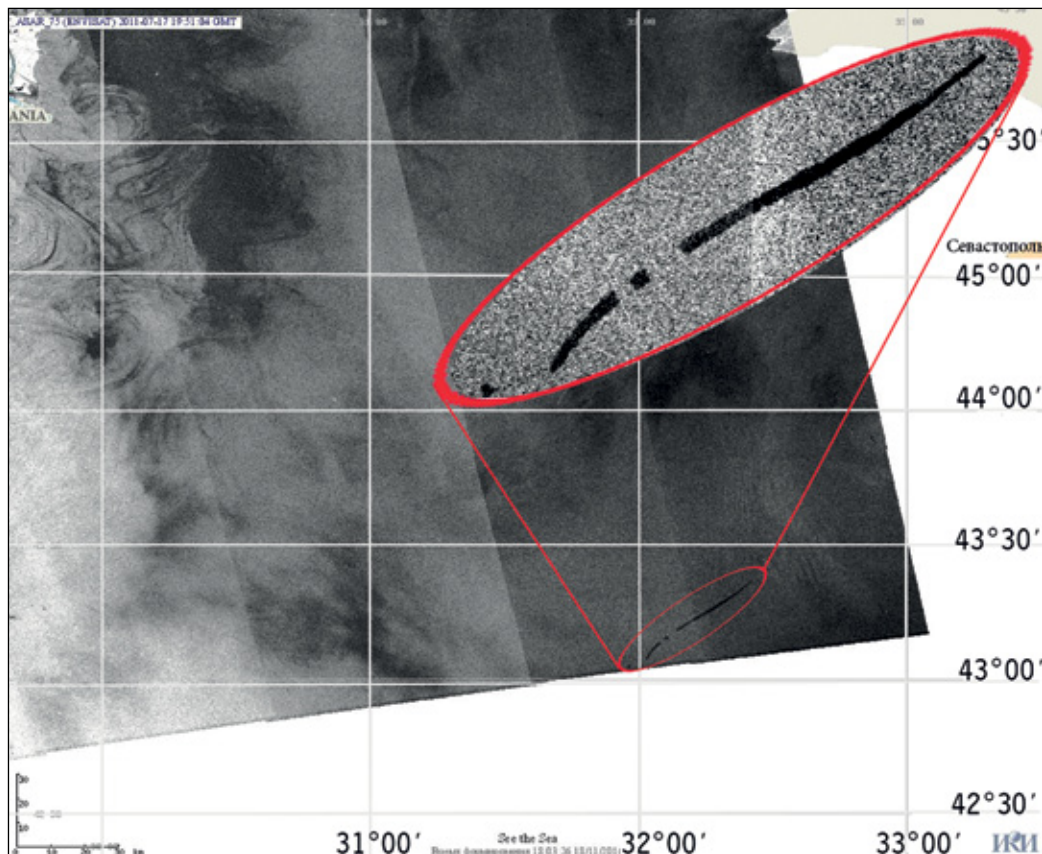


Рис. 4.9. РЛИ ASAR Envisat от 17.07.2011 г., 19:50 UTC. Нефтяные загрязнения на судоходной трассе, направленной к г. Севастополь

Это самый протяжённый сброс, выявленный нами по спутниковым данным в акватории Чёрного моря. Судя по протяжённости и прерывистости разлива, сброс совершался в несколько этапов в течение длительного промежутка времени — не менее пяти часов — и продолжался на момент проведения радиолокационной съёмки. Полоса сброса сужается к северо-западу, в сторону более свежей её части, яркая белая точка показывает текущее положение судна-виновника. За время, прошедшее с начала разлива, форма полосы начала искажаться под воздействием локальных течений и приповерхностного ветра. Совокупная площадь сброса составляет $14,7 \text{ км}^2$.

Вероятным источником столь значительных судовых разливов является промывка танков в открытом море после перевозки нефтепродуктов, растительных масел и других веществ. Танки могут промываться как легально, с соблюдением всех положений конвенции МАРПОЛ-73/78, так и с нарушением принятых норм, поэтому выявляемые на спутниковых изображениях случаи крупноразмерных разливов, обусловленных промывкой танков, требуют контроля на предмет соблюдения требований конвенции МАРПОЛ.

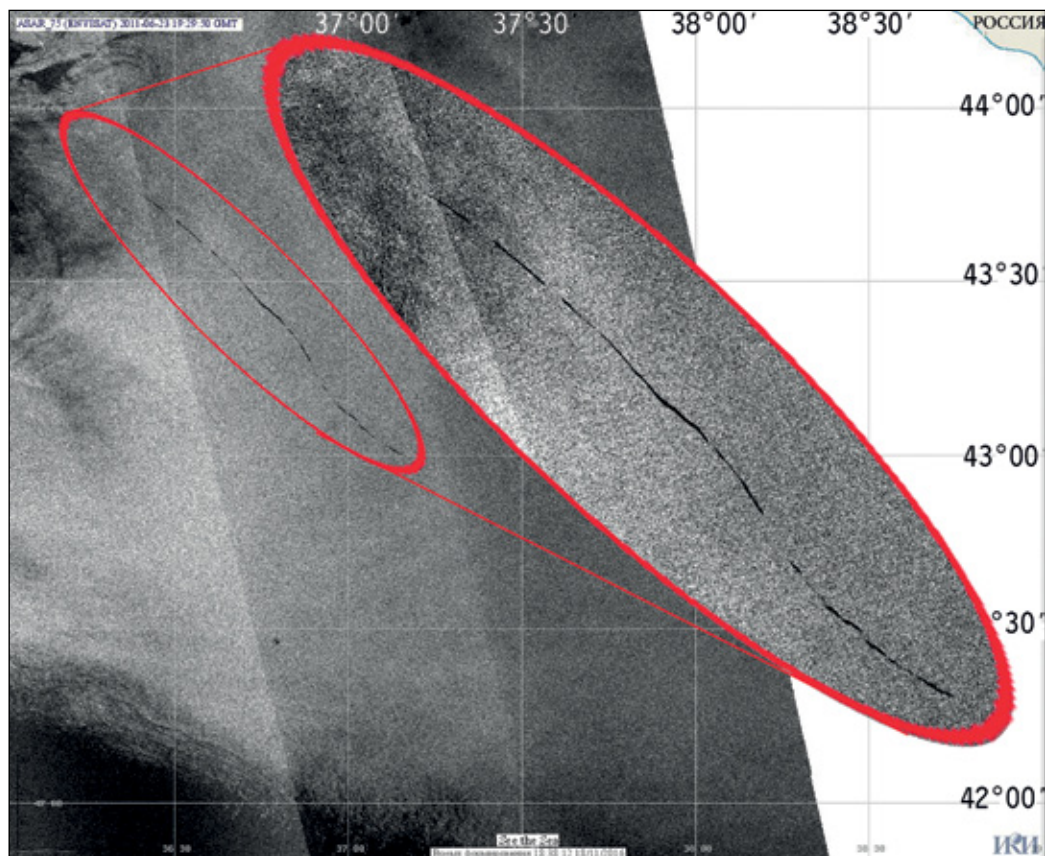


Рис. 4.10. РЛИ ASAR Envisat от 23.06.2011 г., 19:29 UTC. Загрязнение морской поверхности в результате судовых сбросов в восточной части Чёрного моря

На рис. 4.11 приведено радиолокационное изображение, полученное 1 августа 2015 г. над северо-восточной частью Чёрного моря. На РЛИ выделяется плёночное загрязнение явно судового происхождения, но не связанное с промывкой танков. Его возможным источником может быть, например, сброс нефтесодержащих льяльных вод, образующихся в льялах машинных помещений в результате утечек топлива и масла, возникающих при эксплуатации машин, механизмов и устройств. Сброс длиной около 24 км, находящийся на расстоянии 60 км от м. Меганом, имеет прямолинейную форму и сужается к западу, под влиянием ветра и течений он трансформировался и приобрёл характерную форму гребёнки, за счёт чего площадь загрязнения увеличилась, достигая $12,4 \text{ км}^2$.

Обобщённая карта-схема нефтяных загрязнений всей акватории Чёрного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации за 2009–2012 гг., представлена на рис. 4.12. Изображены реальные формы и размеры пятен.

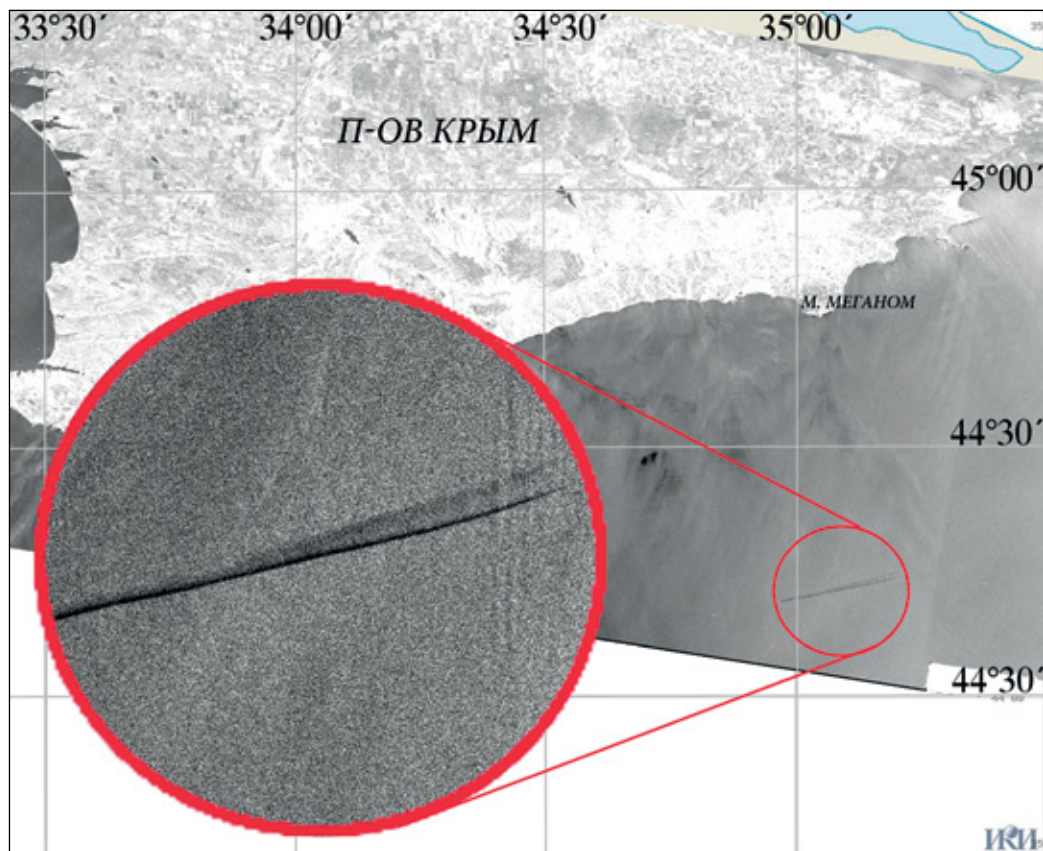
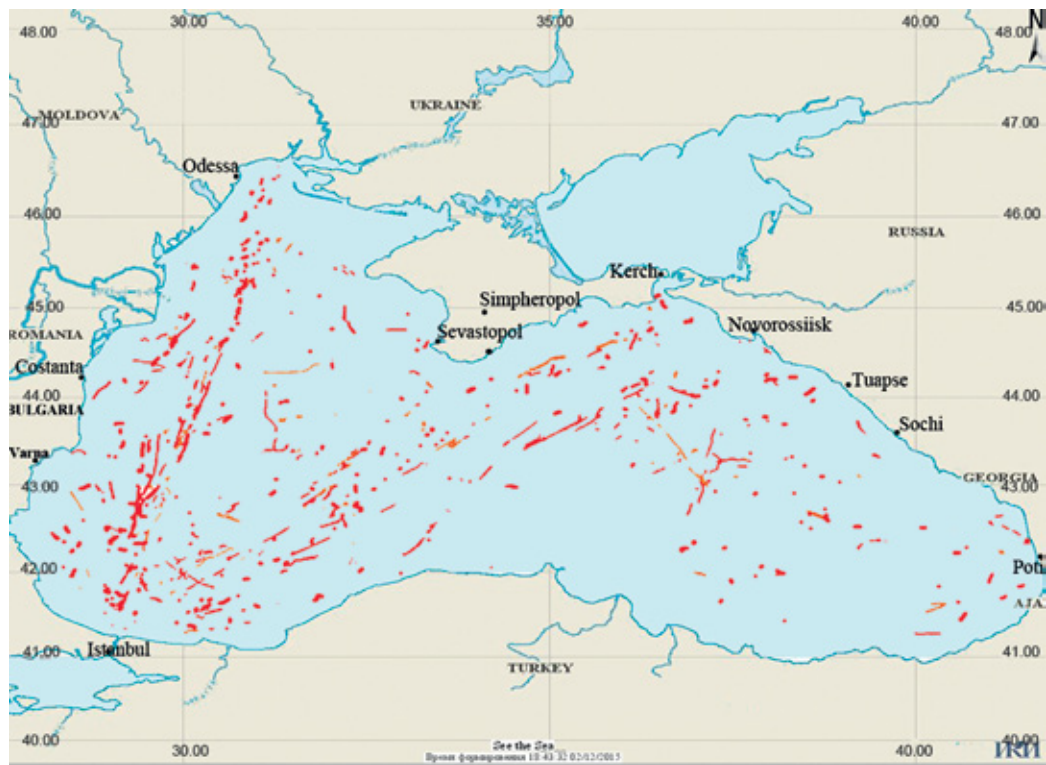


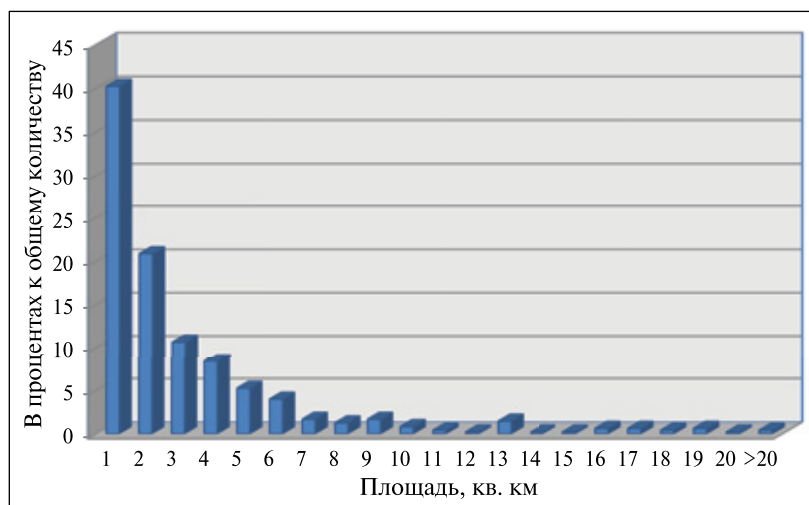
Рис. 4.11. РЛИ ASAR Envisat от 23.06.2011 г., 19:29 UTC. Загрязнение морской поверхности в результате судовых сбросов в северо-восточной части Чёрного моря

Массив пятен чётко вырисовывает основные судоходные трассы. Как и можно было ожидать, сбросы с судов концентрируются вдоль основных судоходных трасс Стамбул-Новороссийск, Стамбул – Керченский пролив, Стамбул-Одесса и Стамбул-Туапсе. Кроме того, большое количество сбросов происходит вблизи крупных портов Болгарии, Турции, Румынии и Украины, а также там, где функционируют нефтеналивные терминалы. В российской части Чёрного моря по-прежнему наибольшему загрязнению подвергается акватория в районе порта Новороссийск и черноморское предпроливье Керченского пролива. К сожалению, география выявленных загрязнений не ограничивается отмеченными выше зонами повышенной концентрации, а охватывает практически всю акваторию моря.

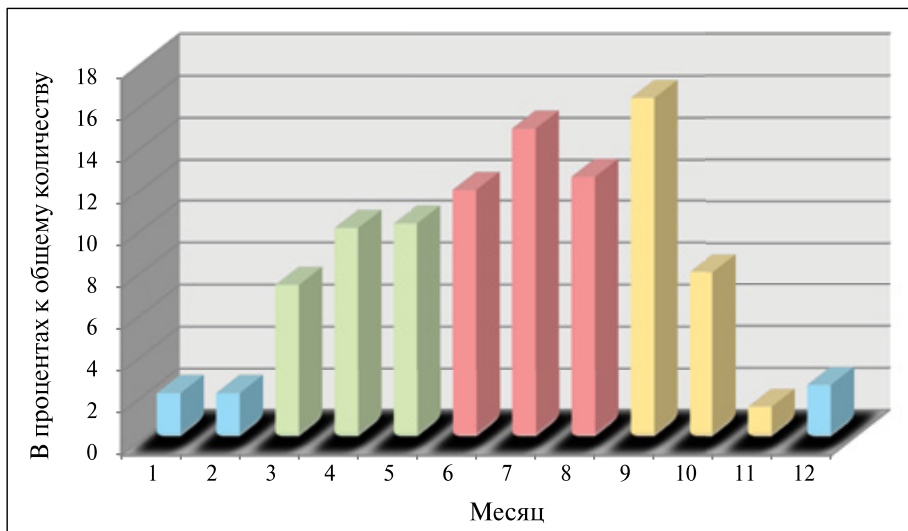
За 2009–2012 гг. спутниковых наблюдений в акватории Чёрного моря выявлено более 600 случаев загрязнений морской поверхности нефтепродуктами в результате судовых сбросов. За каждый год было выявлено соответственно 219, 253 и 234 нефтепродуктоносных судовых сбросов. Совокупная площадь загрязнений, содержащих нефтепродукты, выявленных в разные годы, составляла 790, 806 и 768 км² соответственно.



Р и с. 4.12. Сводная карта нефтесодержащих судовых сбросов в Чёрном море, обнаруженных в результате анализа данных спутниковой радиолокации в 2009–2012 гг.



Р и с. 4.13. Распределение индивидуальных площадей нефтяных загрязнений морской поверхности Чёрного моря, выявленных на основе спутниковых данных



Р и с. 4.14. Сезонная изменчивость количества нефтяных пятен, выявленных по данным спутниковых наблюдений Чёрного моря

Индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от 0,1 до 40 км². Из представленной на рис. 4.13 диаграммы следует, что более 80 % выявленных загрязнений имеют площадь менее 5 км², а в 40 % случаев площадь выявленных загрязнений не превосходит 1 км². Однако довольно часто суда производят многократные сбросы загрязнённых вод в движении на протяжении десятков километров своего пути, и под воздействием ветра и волнения нефтяная плёнка растекается и покрывает большую площадь.

Успешное обнаружение нефтяных загрязнений средствами спутниковой радиолокации в определённой степени обусловлено погодными условиями [Brekke, Solberg, 2005; Espedal, Johannessen, 2000]. Этим объясняется тот факт, что наибольшее число загрязнений, выявленных по радиолокационным данным (см. диаграмму, представленную на рис. 4.14), приходится на период с марта по октябрь, когда скорость ветра и волнение преимущественно умеренные или слабые. С октября по апрель нередко наблюдаются сильные ветра и шторма — условия, при которых плёнки нефтяных загрязнений быстро разрушаются, и заметного выглаживания морской поверхности не происходит.

4.2.2. Нефтяные загрязнения в результате естественных выходов углеводородов с морского дна

Повышенный уровень загрязнения морской среды определяется не только антропогенными, но и природными загрязнениями, в том числе — естественными выходами углеводородов с морского дна.

Интерес к определению районов естественных проявлений углеводородов на морском дне и установлению причин их возникновения растёт повсеместно. Понятие

естественных проявлений углеводородов в данном случае включает в себя грязевый вулканизм, естественные газо- и нефтепроявления и газогидраты. Интерес к исследованию этих явлений вызван, в первую очередь, вероятным наличием связи между естественными проявлениями углеводородов с морского дна и нефтяными и газовыми месторождениями, что превращает эти уникальные явления в своего рода критерий нефтегазопоиска. Знание районов локализации естественных проявлений углеводородов необходимо и для выбора безопасных мест строительства подводных инженерных сооружений. С другой стороны, естественные проявления углеводородов являются постоянно действующими источниками загрязнения, которые необходимо учитывать при оценке экологического состояния акваторий и принимать во внимание при исследовании синоптических и климатических изменений океана.

В последние годы появился целый ряд публикаций, посвящённых грязевому вулканизму, естественным газо- и нефтепроявлениям и газогидратам в Чёрном море [Андреев и др., 2006; Егоров и др., 2011; Круглякова и др., 2009; Шнюков, Клещенко, 2001; Шнюков и др., 2001]. В ходе проведённых исследований в Чёрном море обнаружены струйные газовыделения и холодные метановые сипы (от *англ.* seep — просачивание на дне моря). Они зарегистрированы в глубоководной части и по периметру свала глубин: в районе палео-русла реки Днепр, в акватории севавтопольских бухт, в Керченско-Таманском регионе, в прогибе Сорокина, в грузинском секторе восточной части моря, включая палео-русло реки Чорох, а также в западной части моря на свале глубин болгарского шельфа и в каньоне Витязь. Согласно опубликованным данным, выходы струйного газа широко распространены в акватории Чёрного моря: на шельфе Болгарии обнаружено свыше 480 выходов газа на дне моря, на шельфе Украины в северной и северо-западной частях Чёрного моря обнаружено около 2000 газовых выходов, в грузинском секторе Чёрного моря было выявлено 565 выходов струйного газа, расположенных на глубинах от 14 до 1120 м. Открыто и изучено также множество грязевых вулканов, расположенных в Западно-Черноморской впадине, на континентальном склоне вблизи побережья Болгарии, Турции, Украины и России. Можно сказать, что естественные выходы газов и грязевый вулканизм обнаруживаются в Чёрном море практически повсеместно [Круглякова и др., 2009]. Однако естественные выходы нефти на поверхность Чёрного моря встречаются достаточно редко. В частности, известны выходы нефти на поверхность моря на турецком шельфе вблизи г. Ризе и в грузинском секторе Чёрного моря.

Этот раздел посвящён вопросам применения методов спутникового дистанционного зондирования для выявления и анализа пространственно-временных характеристик нефтепроявлений на морской поверхности, обусловленных естественными выходами углеводородов в глубоководной части акватории Чёрного моря. Основным районом интереса является восточная часть акватории Чёрного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии.

Участок акватории Чёрного моря над континентальным склоном в районе Поти-Батуми привлек наше внимание тем, что в ходе спутникового мониторинга мы регулярно выявляли на спутниковых изображениях этого участка акватории сликообразные образования, радикально отличающиеся по своим структурным характеристикам как от нефтесодержащих сликов, образовавшихся в результате судовых сбросов, так и от сликов, образованных на морской поверхности плёнками биологического происхождения, повсеместно и постоянно встречающихся на морской поверхности.

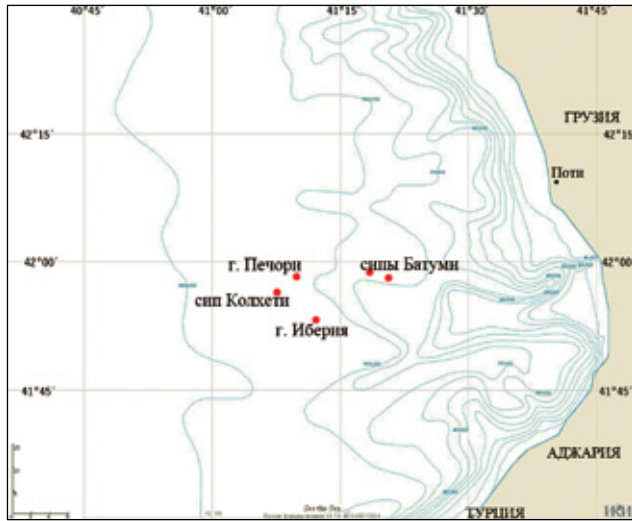
Определяющий признак этого класса сликовых образований заключается в строгой приуроченности их пространственного положения к определённой географической точке с координатами 41°57' с. ш., 41°07' в. д., являющейся исходной точкой для множества выявленных нами сликовых структур, различающихся формой, размерами и направлением распространения. Были обобщены результаты анализа большого объёма разнородных спутниковых данных и выдвинута гипотеза о наличии генетической связи между поверхностными проявлениями плёночных загрязнений этого типа и естественными газо- и нефтепроявлениями в этом районе [Лаврова, Митягина, 2012]. Для подтверждения выдвинутой нами гипотезы к рассмотрению были привлечены опубликованные в научной печати результаты натуральных измерений.

В связи с интересом к естественным выходам углеводородов с морского дна, экспедиционные работы в грузинском секторе Чёрного моря ведутся с 1993 г., начиная с 42-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (июнь 1993 г.). Впоследствии в этом районе экспедиционные работы выполнялись регулярно, в том числе: 46-й рейс НИС «Профессор Водяницкий» (август 1994 г.), рейсы немецких судов «Посейдон» (317-й рейс, октябрь-ноябрь 2004 г.) и «Метеор» (72-й рейс, март-апрель 2007 г., 84-й рейс, март 2011 г.), 26-й рейс российского НИС «Профессор Логачев» (июнь 2005 г.) [Егоров и др., 2011; Wagner-Friedrich, 2007].

Ряд исследований проводился в рамках международных проектов, участниками которых были исследователи как из причерноморских, так и из других европейских государств. В частности, в июне 2005 г., как часть учебной и исследовательской программы ЮНЕСКО, а также в марте-апреле 2007 г. и в марте 2011 г. в рамках немецкого проекта METRO (Methane and methane hydrates within the Black Sea) на континентальном склоне в грузинском секторе Чёрного моря проводились акустические исследования, сопровождаемые заборами проб грунта и детальными геохимическими анализами для определения состава газогидратов и выделяющихся газов [Klaucke et al., 2005, 2006; Reitz et al., 2011].

В ходе экспедиционных работ на внешнем континентальном склоне были обнаружены газовые выходы и газогидраты. Химический анализ отобранных проб и дальнейшие исследования [Егоров и др., 2011; Wagner-Friedrich, 2007] показали, что глубоководные сипы в грузинских водах представляют собой уникальный для Чёрного моря тип струйных газовыделений, в которых метан сосуществует одновременно в свободной форме и в виде газогидратов. Отличительной чертой этих сипов является присутствие следов нефти в донных газогидратах и полное отсутствие признаков грязевого вулканизма. На поверхности моря в районах обнаружения этих сипов различными исследователями отмечалось присутствие нефтяных пятен природного происхождения. В качестве вероятной причины возникновения сипов на грузинском шельфе указывается своеобразие геологического строения юго-восточной окраины Чёрного моря, характеризующегося наличием диапировых складок с ядрами протыкания, в которых образуются пути миграции веществ, в том числе углеводородов, из геологических структур глубокого залегания к разрывам верхних слоёв донных осадков [Туголесов и др., 1985; Klaucke et al., 2005].

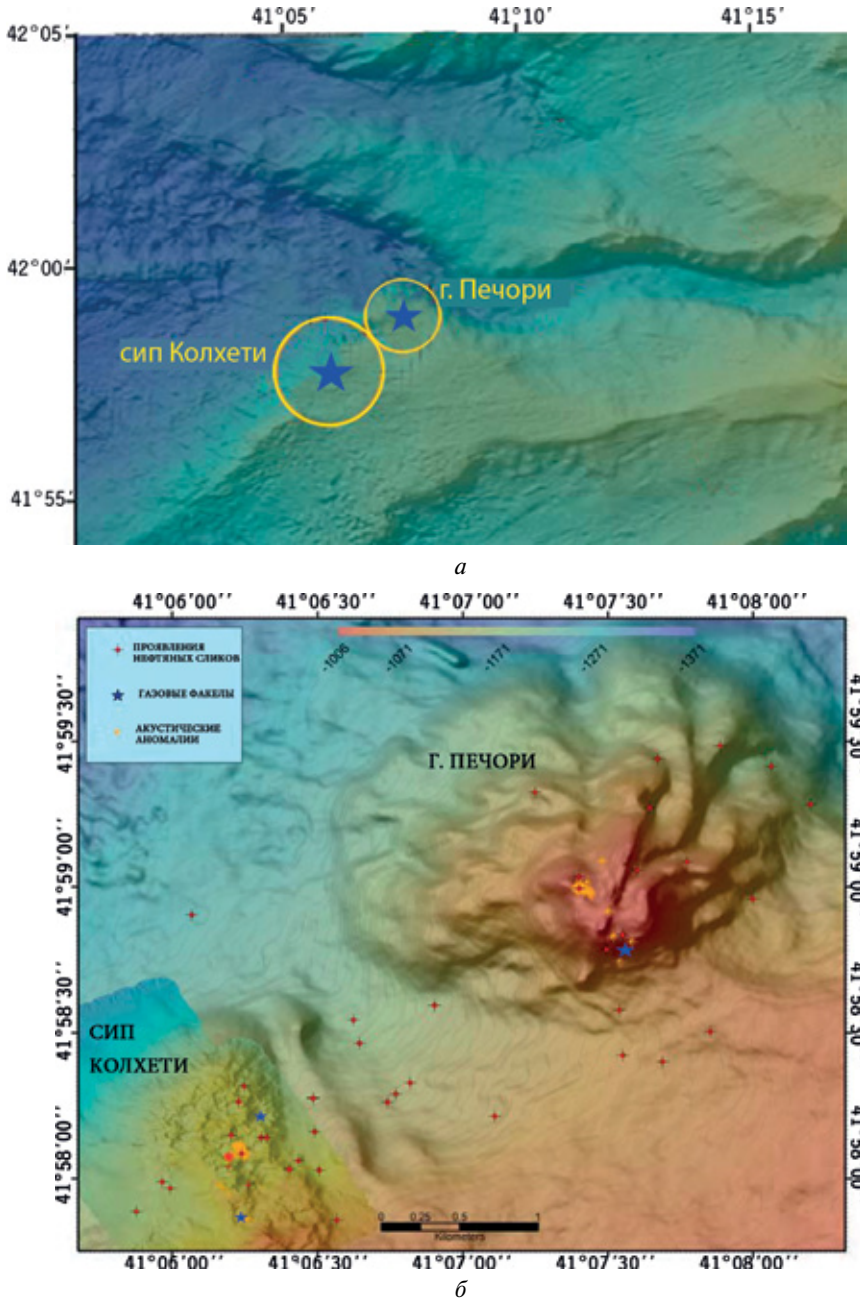
Относительно небольшой участок акватории площадью около 20 км² в районе грузинского континентального склона, где на дне расположен кластер холодных метановых сипов (рис. 4.15) стал своеобразной природной лабораторией.



Р и с. 4.15. Батиметрическая карта морского дна в грузинском секторе Чёрного моря с нанесёнными на неё исследованными метановыми сипами

Методами акустического подводного зондирования производилось детектирование газовых факелов в этом районе. Оказалось, что на хребте Кобулету локализованы подводные выходы газов: газовый факел из кратера диапировой горы Печори и два газовых факела сипа Колхети, функционирующие одновременно. По данным акустического зондирования была построена числовая модель рельефа дна в этом районе [Naehr, MacDonald, 2010]. На основе этой модели показано, что существуют два конусообразных поднятия: диапировая гора Печори, диаметром 2–2,5 км и высотой 75 м и диапир у сипа Колхети диаметром 1,4 км и высотой 20 м (рис. 4.16). Наличие этих конусообразных возвышений позволяет уточнить положение естественных выходов углеводородов на морском дне. Проведённая сейсмологическая съёмка выявила наличие двух ядер прорывания у сипа Колхети и питающий канал горы Печори, которые служат артериями, по которым происходит активная миграция флюидов из глубинных источников к морскому дну [Затягалова, 2012; Шнюков и др., 2005].

В ходе натурных экспериментов определялась также внутренняя структура газовых факелов и было показано, что каждый из них образован несколькими близко расположенными струями газовых пузырьков. Сопоставление эхограммы и сейсмического профиля показало, что ширина газовых факелов соответствует ширине кратеров у горы Печори и сипа Колхети. Наблюдаемое ослабление интенсивности отражённого в газовом факеле эхо-сигнала по направлению от морского дна к поверхности свидетельствовало о том, что потенциально морской поверхности достигают лишь достаточно крупные пузырьки диаметром около 1 см, тогда как более мелкие пузырьки при всплытии разрушаются на первых 100 м, что согласуется с описанным в работе [MacDonald et al., 2002] механизмом переноса нефтепродуктов со дна на морскую поверхность. Выходы нефтегазовых компонент могут проявляться в трёх формах — газовые пузырьки, капли жидкости и заполненные газом пузырьки с нефтяной оболочкой.



Р и с. 4.16. Модель рельефа дна в районе интереса: *а* — рельеф участка дна в районе континентального склона в грузинском секторе Чёрного моря; *б* — сип Колхети и гора Печори. Красные звёздочки — точки проявления нефтяных slickов на поверхности, синие звёздочки — газовые факелы, жёлтые точки соответствуют зарегистрированным акустическим аномалиям водного столба (на основе [Naehr, Macdonald, 2010])

Газовые пузырьки по мере всплытия быстро разрушаются, насыщая толщу морской воды органическим веществом. Жидкие капли, имеющие большую плотность, охлаждаются при соприкосновении с морской водой и опускаются на дно вблизи кратера. Жидкие капли с меньшей плотностью по мере всплытия с больших глубин растворяются или перемешиваются с водой. Все вышеописанные процессы не приводят к образованию нефтяной плёнки на морской поверхности. Преодолеть большие расстояния с большой скоростью оказываются способны только пузырьки газа с нефтяной оболочкой, имеющие при значительном объёме небольшую массу. Внутри такого пузырька находится капля нефтепродукта, образованная за счёт утолщения нижней части нефтяной оболочки пузырька во время всплытия, а силы поверхностного натяжения предохраняют пузырёк от быстрого разрушения. Находящаяся внутри пузырька капля нефти защищена оболочкой от непосредственного контакта с водой, что позволяет ей достичь морской поверхности, где оболочка лопается, газ высвобождается в атмосферу, а нефть остаётся на поверхности [Богушевич и др., 2006; MacDonald et al., 2002]. Таким образом, при естественных выходах углеводорода только малая часть органического вещества попадает на поверхность моря в виде нефтяной плёнки, тогда как наибольшим углеводородным загрязнениям подвержены морское дно и нижние слои водного столба в окрестности естественного источника.

На рис. 4.17–4.20 приведены характерные примеры плёночных загрязнений, детектированных на радиолокационных изображениях морской поверхности, полученных над континентальным склоном в районе Поти-Батуми. На всех приведённых изображениях отчётливо выделяются крупные слики характерных форм. Легко заметить, что во всех приведённых примерах слики имеют фиксированную исходную точку. Эта же закономерность проявляется для всех спутниковых изображений, полученных над данным районом. Сопоставляя места локализации сликов, выявленных на спутниковых изображениях, и места локализации метановых сипов, установленные в ходе натурных экспериментов, мы пришли к заключению, что сликовые структуры соответствуют естественным проявлениям углеводородов из двух близко расположенных метановых сипов, а именно, сипа Колхети и горы Печори на морском дне. На морской поверхности над ними регулярно наблюдаются выбросы относительно небольших объёмов нефти. Наибольшая толщина плёнки наблюдается вблизи точки всплытия. Поверхностный слик формируется под влиянием поля ветра и течений. В зависимости от условий формирования поверхностная плёнка либо вытягивается вдоль направления приповерхностного ветра, либо вовлекается в вихревые движения воды.

На примере, представленном на рис. 4.17, нефтяная плёнка после всплытия на поверхность начинает распространяться в северо-западном направлении, принимая под влиянием сильного приповерхностного ветра форму узкой вытянутой извилистой полосы. На расстоянии около 39 км от начальной точки нефтяная плёнка захватывается поверхностным течением, вовлекается в вихревые движения и продолжает мигрировать вместе с вихревой структурой. Общая площадь нефтесодержащего слика — 44,5 км².

Пример, представленный на рис. 4.18, иллюстрирует, насколько сложной может оказаться траектория дрейфа нефтяной плёнки под влиянием сформировавшейся в районе интереса картины ветра и течений. На изображении чётко прослеживаются три сликовых полосы, образованных вышедшей на поверхность нефтяной плёнкой.

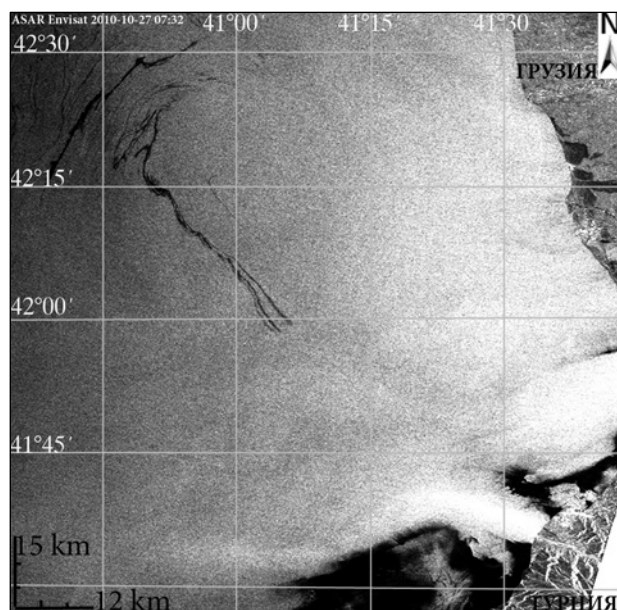


Рис. 4.17. РЛИ ASAR Envisat от 27.10.2010 г., 07:32 UTC. Пример поверхностного проявления естественного нефтяного загрязнения на спутниковом радиолокационном изображении юго-восточной части Чёрного моря

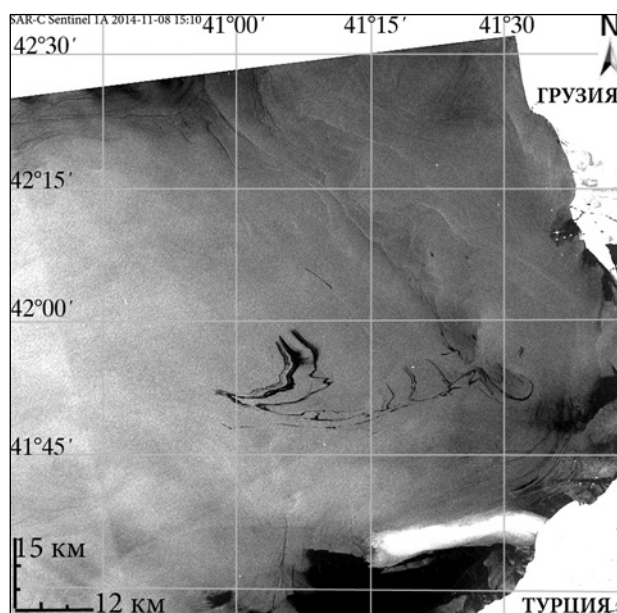
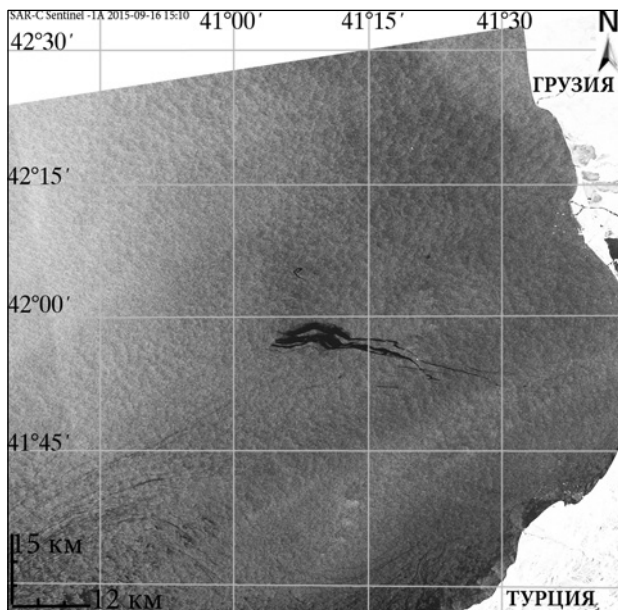
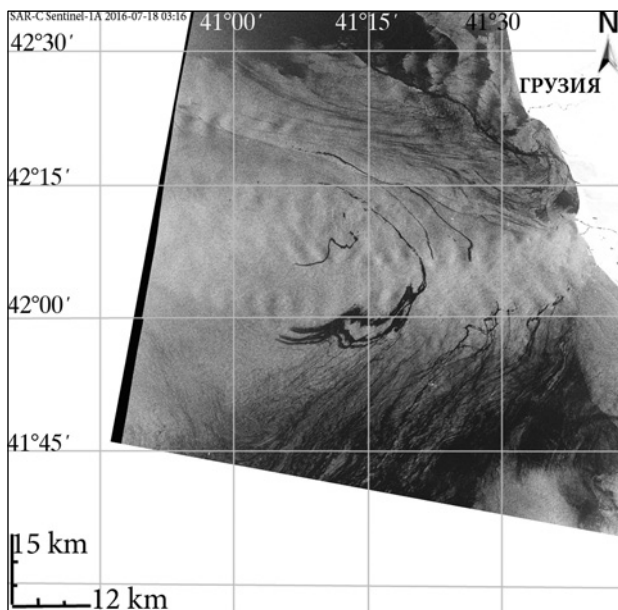


Рис. 4.18. РЛИ SAR Sentinel-1A от 08.11.2014, 15:10 UTC. Пример поверхностного проявления естественного нефтяного загрязнения на спутниковом радиолокационном изображении юго-восточной части Чёрного моря



Р и с. 4.19. РЛИ SAR Sentinel-1A от 16.09.2015 г., 15:10 UTC. Пример поверхностного проявления естественного нефтяного загрязнения на спутниковом радиолокационном изображении юго-восточной части Чёрного моря



Р и с. 4.20. РЛИ SAR Sentinel-1A от 18.07.2016, 03:16 UTC. Пример поверхностного проявления естественного нефтяного загрязнения на спутниковом радиолокационном изображении юго-восточной части Чёрного моря

После всплытия на поверхность нефтяные плёнки немедленно вовлекаются в движения, обусловленные субмезомасштабным антициклоническим вихрем, развивающимся в непосредственной близости от точки выхода нефти на поверхность. Вблизи точки всплытия наблюдается область, покрытая достаточно толстой плёнкой, по мере распространения слики изгибаются, толщина плёнки уменьшается. Пройдя по дуге около 24 км, на расстоянии 14 км к юго-западу от точки всплытия, слик изламывается под острым углом и плёнка начинает распространяться в восточном направлении в сторону берега, перемещаясь более чем на 54 км. По мере продвижения в направлении берега от основного слика ответвляются компоненты, захваченные на этот раз уже вдольбереговым течением, и начинают двигаться вдоль береговой черты. Общая площадь нефтесодержащего слика — около 28 км².

На примере, представленном на рис. 4.19, плёнка под воздействием ветра практически прямолинейно распространяется в восточном направлении, в сторону береговой черты, формируя параллельные сужающиеся полосы, постоянно превращающиеся в тонкие нитевидные слики, просматривающиеся на РЛИ вплоть до расстояния 37 км от точки всплытия. Хорошо заметна «полосчатая» структура сликов. Общая площадь нефтесодержащего загрязнения — 45,5 км².

На рис. 4.20 представлен пример выброса, площадь которого составляет около 60 км². После выхода на поверхность нефтяная плёнка распространяется на северо-восток, постепенно растекаясь и принимая под влиянием сложной структуры течений прихотливую изломанную форму, постепенно слик сужается, а затем, вовлекаясь в вихревые движения, сильно искривляется и распространяется в западном направлении.

На всех приведённых выше изображениях отчётливо выявляется характерный признак, общий для естественных нефтепроявлений на морской поверхности в рассматриваемом районе — их «полосчатая» структура. Вблизи точки всплытия наблюдаются три сликовые полосы различной ширины. В процессе эволюции и дрейфа слика эти полосы могут слиться, а могут продолжать эволюционировать относительно синхронно, сохраняя при этом свою обособленность.

На рис. 4.21 приведён фрагмент РЛИ, отражающий пространственную структуру нефтепроявлений в непосредственной близости от точки выхода на морскую поверхность. Факт наличия трех четко различимых полос объясняется тем, что нефть доставляется на морскую поверхность газовыми пузырьками в результате одновременной активности трёх газовых факелов: из горы Печори и двух ядер прорывания сипа Колхети (для сравнения см. рис. 4.16).

Нами были проанализированы также изображения спутниковых сенсоров оптического диапазона, полученные над континентальным склоном вблизи побережья Грузии. Естественные нефтепроявления отчётливо проявляются и на цветосинтезированных изображениях, однако для сенсоров оптического диапазона существенными ограничивающими факторами являются требования к освещённости и отсутствию облачности, благодаря чему они проигрывают радиолокационным данным, когда речь идёт о непрерывном мониторинге и накоплении статистических данных. Тем не менее, использование оптических изображений, особенно полученных в зоне солнечного блика, зачастую помогает разрешить неоднозначности в интерпретации радиолокационных данных и уточнить природу плёнок, формирующих слики, относя их к классам нефтяных или биологических плёнок.

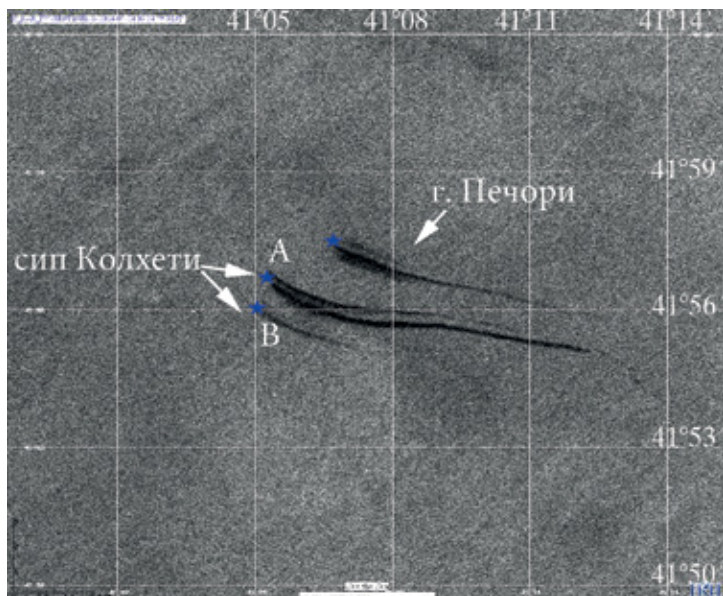


Рис. 4.21. РЛИ SAR Sentinel -1A от 24.05.2016, 03:24 UTC. Пример поверхностного проявления естественного нефтяного загрязнения на спутниковом радиолокационном изображении юго-восточной части Чёрного моря. Совокупная площадь загрязнения 5,2 км²

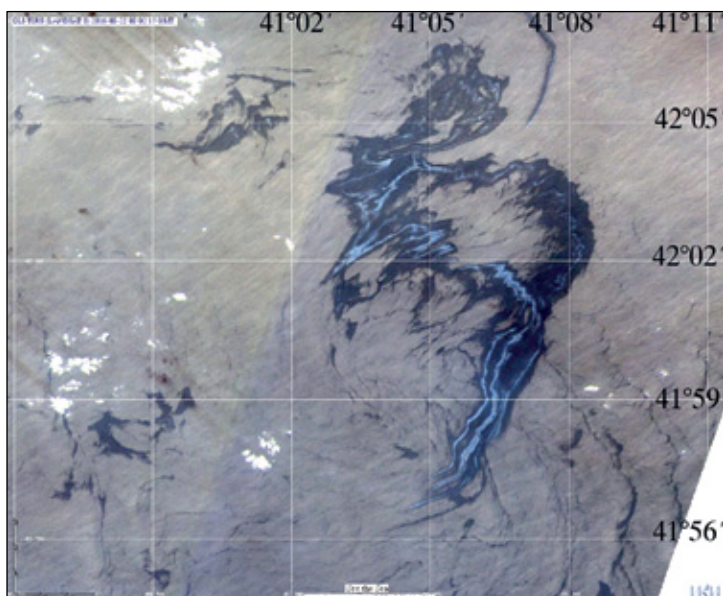


Рис. 4.22. Фрагмент цветосинтезированного изображения сенсора Landsat-8 OLI (4-й, 3-й и 2-й спектральные каналы) от 22.08.2016 г., 08:02 UTC. Пример поверхностного проявления естественного нефтяного загрязнения на спутниковом изображении оптического диапазона юго-восточной части Чёрного моря

Это связано с тем, что в данных оптического диапазона нефтесодержащие плёнки и плёнки биологической природы проявляются различным образом. Нефтесодержащие плёнки имеют повышенную яркость и проявляются в цветостнтезированных изображениях как светлые структуры. Более подробно этот вопрос рассматривается в п. 2.5 настоящей монографии.

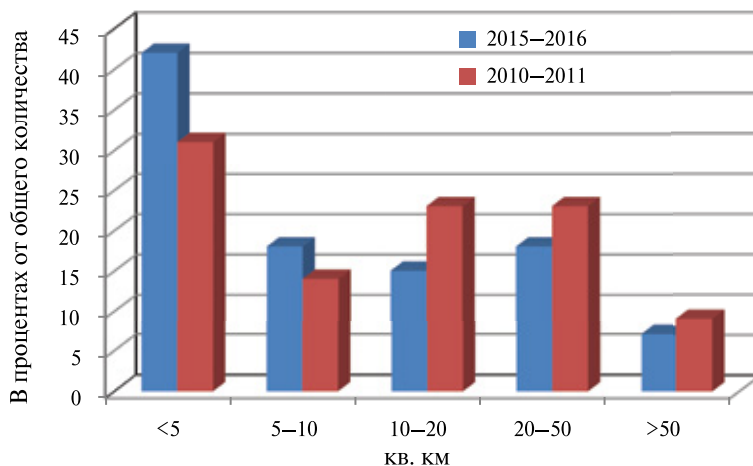
На рис. 4.22 представлено изображение, синтезированное на основе данных сенсора OLI ИСЗ Landsat-8, полученных в зоне солнечного блика. На нем отчётливо просматриваются три сформированные тонкие протяжённые полосы повышенной яркости, окружённые тёмным ореолом, расширяющимся по мере растекания плёнки. После выхода на поверхность три полосы нефтепроявления распространяются в северо-восточном направлении на расстояние примерно 10 км от точки всплытия. После этого две струи отклоняются на запад, двигаясь по траектории с множеством изломов, а третья полоса продолжает движение в первоначальном направлении, и несколько позже, описав дугу, присоединяется к общей траектории. Общая площадь нефтесодержащего слика — 53,7 км².

Приведённый пример показывает, что сложная многокомпонентная структура нефтепроявления зачастую приводит к существенному усложнению траектории его распространения под влиянием ветра и течений, делая её плохо предсказуемой, что понижает достоверность прогноза распространения загрязнения морской поверхности на основе ныне существующих моделей.

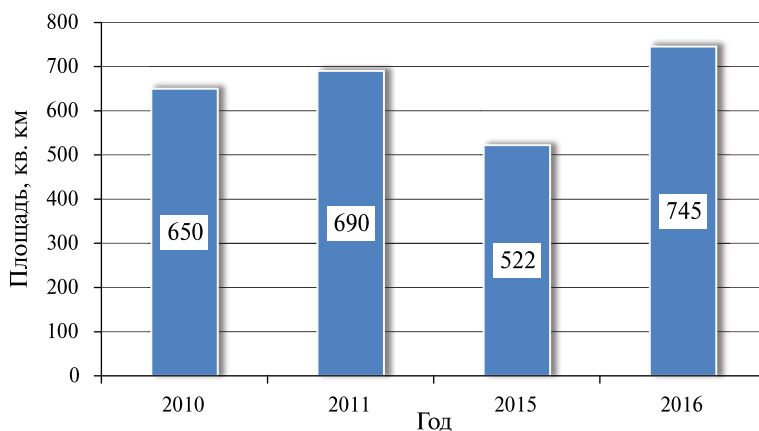
С целью получения количественных оценок и выявления изменчивости параметров естественных нефтепроявлений на морской поверхности, мы провели ретроспективный анализ всех радиолокационных изображений акватории Чёрного моря над континентальным шельфом Чёрного моря в районе Поти-Батуми, полученных сенсорами SAR ERS-2 и ASAR Envisat в течение 2010–2011 гг., с целью определения параметров идентифицированных на них сликовых структур, обусловленных выделением естественных углеводородов с морского дна [Mityagina, Lavrova, 2015]. Результаты ретроспективного анализа сравнивались с результатами анализа радиолокационных данных, полученных в том же районе SAR Sentinel-1 за двухлетний период с октября 2014 по октябрь 2016 г. и данными сенсоров оптического диапазона. Большой объём имеющихся в нашем распоряжении данных позволил провести обобщения и получить статистически достоверные результаты.

Нефтепроявления на морской поверхности были выявлены на 49,5 % от всех РЛИ, полученных над районом интереса в 2009–2011 гг., тогда как в 2015–2016 гг. нефтепроявления идентифицированы на 72 % снимков. Были построены распределения индивидуальных размеров нефтесодержащих пятен природного происхождения, выявленных на спутниковых данных в 2009–2011 гг. и в 2015–2016 гг. (рис. 4.23). Оказалось, что в 2015–2016 гг. разгрузки происходили чаще, но при этом средний размер наблюдаемого нефтепроявления был несколько меньше. Следует подчеркнуть, что более трети всех выявленных на морской поверхности естественных нефтепроявлений имеют площади, превышающие 10 км², а в 20 % выявленных случаев индивидуальные площади нефтепроявлений превосходят 20 км².

Распределение совокупных площадей загрязнения морской поверхности юго-восточной части Чёрного моря в результате нефтепроявлений из сипа Колхети и горы Печори, выявленных за год по спутниковым данным, представлено на рис. 4.24.



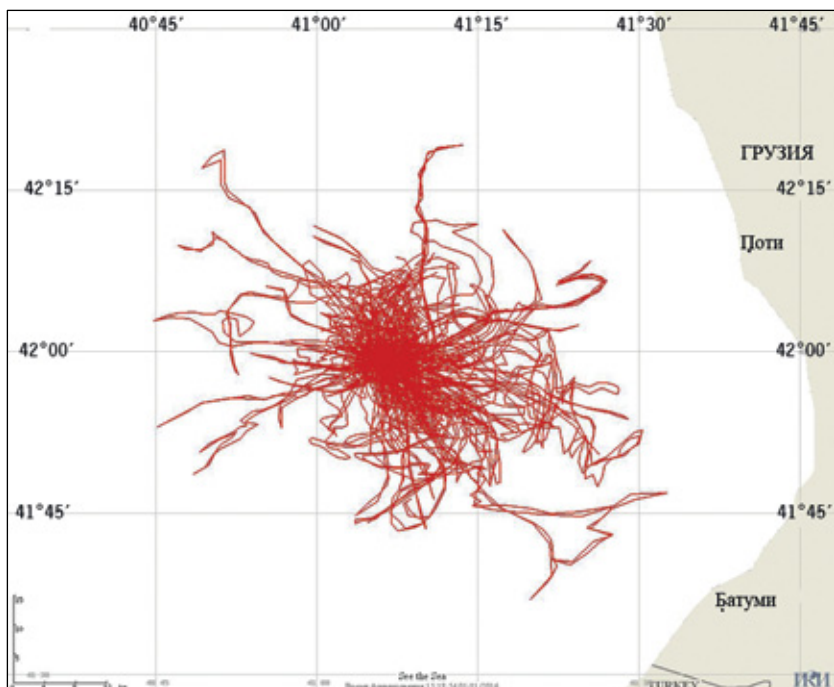
Р и с. 4.23. Изменчивость индивидуальных размеров нефтесодержащих пятен природного происхождения в юго-восточной части Чёрного моря



Р и с. 4.24. Совокупные площади загрязнения морской поверхности юго-восточной части Чёрного моря в результате нефтепроявлений из сипа Колхети и горы Печори, выявленные за год по спутниковым данным

Построена карта нефтяного загрязнения поверхности Чёрного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии, позволяющая оценить вероятность загрязнения различных участков морской поверхности в этом районе (рис. 4.25). Площадь акватории, имеющей высокую вероятность загрязнения плёнками в результате естественных нефтепроявлений, составляет около 850 км². В отдельных случаях плёнки под влиянием ветра и течений распространяются на расстояния до 45 км от точки выхода на морскую поверхность.

По результатам проведённых спутниковых наблюдений восточная часть акватории Чёрного моря в районе континентального склона вблизи побережья Грузии должна быть отнесена к районам экологического риска.



Р и с. 4.25. Обобщённая схема нефтяного загрязнения морской поверхности над районом естественных выходов углеводородов со дна в юго-восточной части Чёрного моря

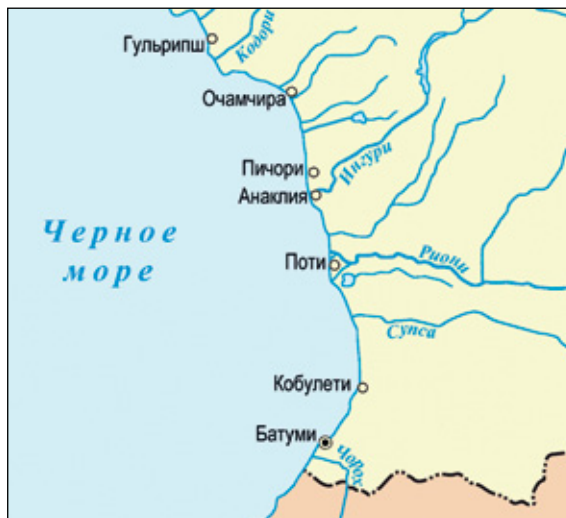
4.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА, ВЫНОСИМОГО РЕКАМИ В ВОСТОЧНУЮ ЧАСТЬ ЧЁРНОГО МОРЯ

Чёрное море одно из самых изученных морских бассейнов на планете. Однако некоторые процессы требуют дополнительных исследований. К таким можно отнести и распространение взвешенных веществ в прибрежной зоне. Ситуация меняется в последние годы не в лучшую сторону, в связи с повышением уровня загрязнения моря, что не в последнюю очередь связано со стоком воды и наносов с прилегающей суши. В экономике Чёрного моря на передний план выходят перевозка грузов, а также добыча и транспортировка нефти. В связи с этим уже начато расширение существующих портов; планируется также строительство новых.

С речными наносами связаны такие актуальные прикладные вопросы, как размыв берегов, искусственное пляжеобразование, антропогенное загрязнение моря и т.д. Эти вопросы особенно злободневны сейчас, когда отступление берегов, вызванное дефицитом береговых наносов, принимает необратимый характер. Естественно, суммарные выносы взвешенных наносов нельзя отождествлять с общим количеством вещества, переходящего во взвесь морей и океанов, так как не весь суспендированный материал, приносимый реками к урезу морской воды, остаётся во взвешенном состоянии после смешения речных вод с морскими, значительная его часть при этом выпадает в осадок [Витюк, 1979].

Поступление в море взвешенных и растворенных терригенных веществ, их распространение в прибрежной зоне является сложным и многогранным процессом, при исследовании которого нужно учитывать множество факторов. Данной проблеме посвящено много научных статей, практически все рассматривают некие региональные особенности, связанные с влиянием конкретных речных, устьевых и морских факторов, а также с географическими особенностями береговой зоны [Завьялов и др., 2014; Lina et al., 2015; Teodoro, Almeida, 2011]. Первоочередную роль в подобных исследованиях играет численное моделирование процессов выноса и распространения взвешенного вещества в прибрежной зоне [Журбас и др., 2011; Lina et al., 2015; Osadchiv, Zavialov, 2013]. Однако любое моделирование требует верификации его результатов. Развитие спутниковых средств и доступность данных дистанционного зондирования из космоса уже за более чем тридцатилетний период позволяет изучать влияние различных факторов на пространственное распространение взвешенного вещества по большим акваториям в различные периоды наблюдений. Основными факторами, влияющими на распространение взвешенного вещества, выносимого реками, считаются речной сток, приливные и вдольбереговые течения, топография дна и ветровое воздействие. Поскольку Чёрное море можно считать бесприливным, то приливные течения не влияют в нем на распространение взвешенного вещества.

Общее число рек, впадающих в Чёрное море, около тысячи и они сильно отличаются друг от друга по водности и по величине бассейнов. Преобладающее большинство из них малые реки и лишь приблизительно 500 имеют длину больше 10 км. В море впадает также множество временных водотоков. К категории крупных (с площадью водосбора больше 10 000 км²) относятся только 10 рек. Также в больших пределах колеблется их водность. Максимальное значение модуля поверхностного стока (среднее количество воды, стекающее с единицы водосборной площади в единицу времени) наблюдается во влажных субтропиках Аджарии (60–70 л/с с 1 км²), а минимальное в западном и северном регионах моря (1–2 л/с с 1 км²) [Джаошвили, 2002].



Р и с. 4.26. Основные реки, впадающие в восточную часть Чёрного моря

В восточной части моря в него впадают более 100 рек, и значение модуля стока тут несравненно выше, чем, например, с территории России. Общее количество годового стока речных вод в Чёрное море с территории Грузии (с учётом малых рек) составляет $46,0 \text{ км}^3$. Из этого количества почти три четверти приходится на крупные реки: Бзыбь — $3,79 \text{ км}^3$; Кодори — $4,17 \text{ км}^3$; канал Эрисцкали, куда переброшен сток Ингури после зарегулирования — $3,15 \text{ км}^3$; Риони — $13,37 \text{ км}^3$ и Чорох — $8,71 \text{ км}^3$ (рис. 4.26). Подробные данные по стоку рек Чёрного моря и в частности грузинских рек представлены в отчёте Европейского агентства по охране окружающей среды [Джаошвили, 2002].

При разработке методов оценки влияния различных факторов на распространение взвешенного вещества, выносимого реками в восточную часть Чёрного моря, мы ограничились изучением выносов рек Риони и Чорох.

Риони — одна из крупнейших рек западной Грузии. Её протяжённость составляет 327 км, площадь бассейна достигает 13400 км^2 . Река берет своё начало на южном склоне Кавказского хребта, течёт по Колхидской низменности и впадает в Чёрное море у города Поты. При впадении в Чёрное море Риони образует дельту. Основная часть стока (до 90 %) сбрасывается в море по каналу, сооружённому в 1939 г., в целях предохранения г. Поты от затоплений во время больших паводков. Средний годовой сток Риони составляет: через северную дельту — $9,62 \text{ км}^3$ и через южный рукав — $3,75 \text{ км}^3$. Сток наносов в Чёрное море достигает $6,9 \text{ млн м}^3$ в год. Из-за смешенного питания реки — ледникового и дождевого (как известно, Колхидская низменность, через которую протекает Риони, знаменита повышенной влажностью и обильными осадками круглый год, до 1500 мм в среднем) — уровень воды в реке повышается несколько раз в году. Уровень воды в реке из-за таяния снега и ледников в горах повышается в апреле и достигает своего максимума в июне. Половодье длится до конца августа. С конца сентября уровень воды в реке повышается вновь в связи с сильными осадками и достигает своего максимума в октябре-ноябре. Минимальный уровень воды наблюдается в декабре-феврале. Средний расход воды в устье $405 \text{ м}^3/\text{с}$. Воды Риони отличаются большой мутностью, весной до 2650 г/м^3 .

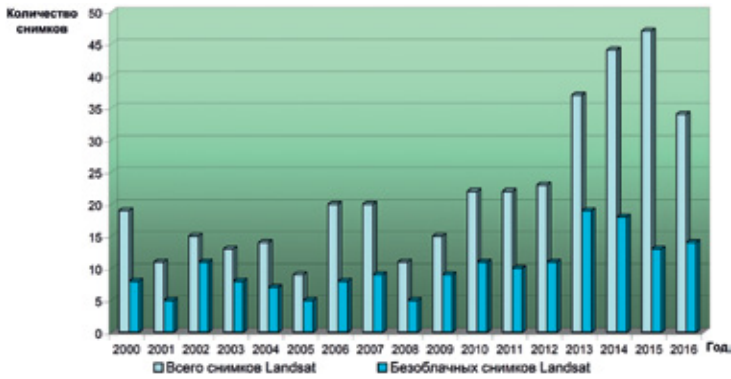
Река Чорох берет своё начало в Малоазиатской части Турции, на южных склонах Понтийского хребта и протекает по территории двух стран: Турции (412 км) и Грузии (26 км). Чорох впадает в Чёрное море вблизи Батуми, Грузия. Средний годовой сток реки составляет $6,824 \text{ км}^3$, годовой сток наносов в море — $5,8 \text{ млн м}^3$. Около 85 % годового стока воды реки Чорох приходится на период май-июль [Джаошвили, 2002].

Рельеф дна в восточной части Чёрного моря характеризуется узкой прибрежной отмелью, которая уменьшается по направлению к югу. В северной части рассматриваемой акватории изобата 50 м находится в 7 км от береговой черты, а в районе Кобулетти подходит практически к берегу. Ещё одна своеобразная особенность донной топографии прибрежной части этого района Чёрного моря — наличие подводных каньонов. Несколько групп и ряд одиночных каньонов сосредоточены между устьями рек Мзымта и Чорох. Вершины большинства каньонов лежат на глубинах 15–25 м, некоторые же врезаются в береговую зону, и их крутой свал начинается с 6–10 м. Уклоны ложа варьируют в пределах $6\text{--}20^\circ$, встречаются также отвесные уступы, крутизна боковых откосов достигает 45° , на отдельных участках наблюдаются вертикальные стенки. В морской части каньоны прослеживаются до глубин более 1000 м. Каньоны вносят существенную коррективу в распределение наносов, по каналам их стока на

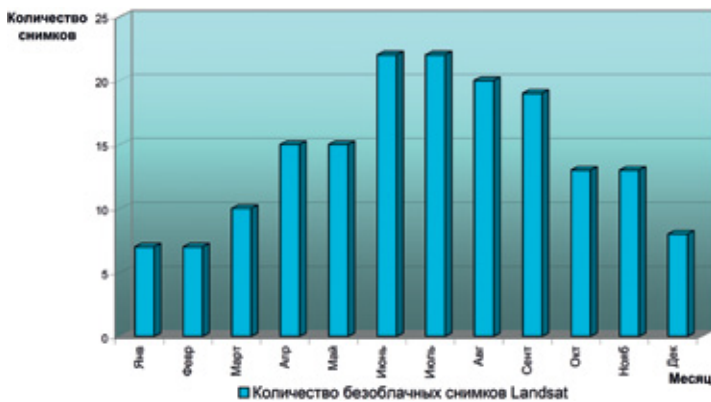
большие глубины выносятся около 2000 тыс. м³ крупных береговых наносов. Самое большое количество пляжеобразующих наносов поглощается Чорохским каньоном.

Наши исследования влияния различных факторов на распространение взвешенного вещества, выносимого реками в восточную часть Чёрного моря, базировались на использовании данных следующих сенсоров:

- Спутников серии Landsat за период 2000–2016 гг. Был выбран фрейм с центром в точке 41,8° с. ш., 41,4° в. д. (Path 172; Row 31), который полностью охватывает район выносов рек Риони и Чорох. В период 2000–2016 гг. съёмка осуществлялась сенсорами TM Landsat-5 (2000, 2002–2003, 2006–2007, 2009–2011), ETM+ Landsat-7 (2000–2016) и OLI Landsat-8 (2013–2016). В общей сложности за эти годы было отснято и проанализировано 375 кадров. Примерно половина изображений содержала информацию о выносах рек, в остальных мешала облачность. Хотелось бы отметить, что в 2015 г. безоблачных кадров была только треть. Информация по годам о наличии общего количества снимков и снимков, пригодных для анализа, представлена на рис. 4.27а.



а



б

Рис. 4.27. Наличие данных сенсоров спутников серии Landsat для восточной части Чёрного моря: а — общее число снимков и количество безоблачных изображений по годам; б — количество безоблачных снимков по месяцам в период 2000–2016 гг.

- MERIS Envisat за период 2003–2012 гг. Для анализа выбирались изображения, полученные синхронно с наиболее информативными данными сенсоров спутников Landsat. На основе данных MERIS Envisat строились карты TSM (Total suspended matter).
- MSI Sentinel-2A за период август 2015 г., декабрь 2015 г. – сентябрь 2016 г. Всего было получено 51 изображение, из них информативных, т.е. безоблачных или малооблачных — 25.

Методика работы со спутниковыми данными была аналогична описанной в разд. 3.5. Для всех безоблачных или малооблачных дней были построены цветосинтезированные изображения в естественных цветах. Не считая данных MERIS Envisat, число таких изображений составило 191. Отметим, что для каждого месяца года имеются данные, пригодные для анализа (рис. 4.27б). Наличие такой базы спутниковых данных позволяет делать статистически обоснованные выводы.

По исходным данным, полученным в видимом диапазоне, проводилась процедура классификации в информационной системе STS (см. разд. 3.5). На цветосинтезированных изображениях высокого пространственного разрешения (рис. 4.28а), классификационных схемах (рис. 4.28б) и на соответствующих картах TSM (рис. 4.29) выделялись три основных области плюма, различающиеся количеством взвешенного вещества и, соответственно, цветностью. Напомним, что под первой областью мы понимаем акваторию, непосредственно примыкающую к устью реки, где содержится основное количество речных наносов, состоящих в первую очередь из песка. Вторая область, окаймляющая первую, содержит мелкодисперсные алевритовые и пелитовые непляжеобразующие фракции. Третья — область, содержащая частицы мелкодисперсной фракции (см. разд. 3.5). Следует отметить, что для рек, впадающих в восточную часть Чёрного моря и несущих большое количество наносов, данные три области более ярко выражены, чем это наблюдалось для вытока реки Висла.

Для определения более точных максимальных и минимальных значений количества взвешенного вещества (TSM) по данным MERIS Envisat строились карты двух типов: более детальные со шкалой от 0 до 30 г/м³ (см. рис. 4.29а) и менее детальные, но позволяющие более точно определить максимальные значения, со шкалой от 0 до 60 г/м³ (см. рис. 4.29б). Для акватории восточной части Чёрного моря для каждой из характерных областей выноса значения концентрации взвешенного вещества составили: для первой области — от 30 до 50 г/м³; для второй области — от 13 до 18 г/м³; для третьей области — от 5 до 12 г/м³. Как было отмечено в разд. 3.5, величина концентрации взвешенного вещества, определённая по спутниковым данным, может сильно отличаться от измеренной *in-situ*. Так, например, в работе [Джаошвили, 2002] приводятся следующие оценки: в районе непосредственного влияния р. Чорох концентрация наносов на поверхности моря может достигать 1000–2000 г/м³, а мутность Риони меняется в пределах 1000–1500 г/м³. Ни один стандартный алгоритм определения концентрации взвешенного вещества по спутниковым данным не может давать такие величины. При такой концентрации данная акватория будет идентифицироваться как суша. Подобную ситуацию мы наблюдали в районе порта Бронка в Финском заливе (см. разд. 3.7). Величины концентрации взвешенного вещества, определённые по спутниковым данным, оправдано использовать только для качественных оценок.

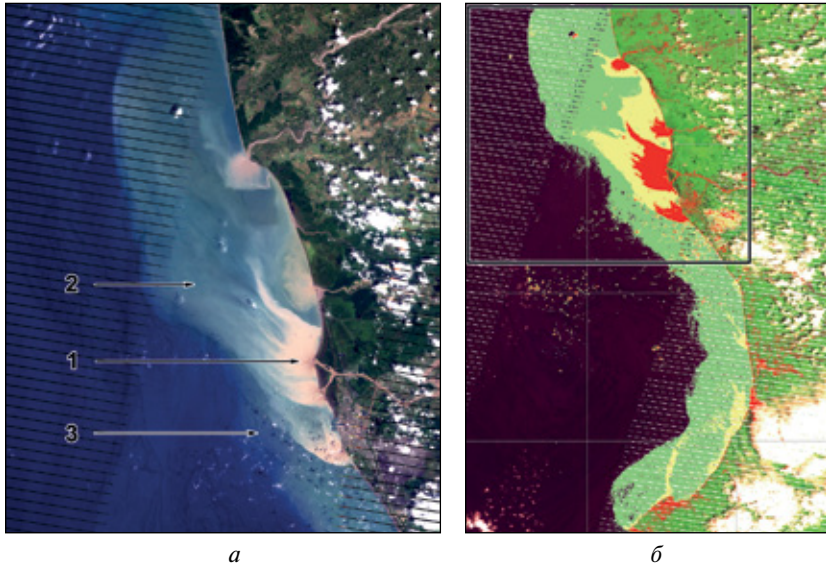


Рис. 4.28. Три основных области плюма: *a* — фрагмент цветосинтезированного изображения Landsat-7 ETM+ от 08 июля 2005 г., 07:45 GMT. Стрелки указывают на три области плюма, различающиеся количеством взвешенного вещества; *б* — результат классификации по трём классам. Красный цвет соответствует области 1, жёлтый — области 2, зелёный — области 3. Прямоугольник отмечает положение фрагмента, представленного на рис. 4.28*a* [Lavrova et al., 2015]

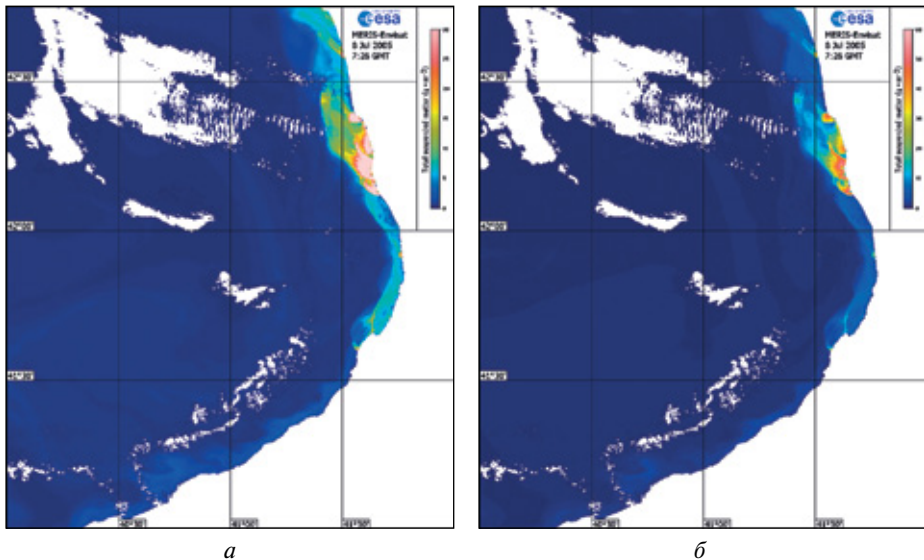


Рис. 4.29. Карты TSM, построенные с различной точностью на основе данных MERIS Envisat от 8 июля 2005 г., 07:26 GMT: *a* — детальная шкала от 0 до 30 г/м³; *б* — менее детальная шкала от 0 до 60 г/м³, позволяющая определять максимальные значения. Разница между съёмками ETM+ Landsat-7 (см. рис. 4.28) и MERIS Envisat составила 19 мин [Lavrova et al., 2015]

Как показывает анализ данных, представленных на рис. 4.28 и 4.29, все три способа — цветосинтезированное изображение в естественных цветах, результат классификации по исходным данным и карты TSM — одинаково хорошо позволяют выделить все три области плюма и соответственно изучать их развитие и распространение.

Проведённый анализ всей совокупности спутниковой информации показал, что плюмы рек Риони, Хоби и Супса наблюдаются на всех изображениях видимого диапазона, независимо от времени года. Это объясняется смешанным питанием этих рек: дождевого и ледникового. Дожди усиливаются в летне-осенний период. Сезонное различие наблюдается в количестве взвешенного вещества в акватории, непосредственно примыкающей к устью (область 1, рис. 4.28а). Средняя величина концентрации взвешенного вещества, оценённая на основе данных MERIS Envisat, составила 40 г/м^3 , в июле и октябре она возрастала до 60 г/м^3 .

Плюм реки Чорох имеет ярко выраженный сезонный характер. В период снеготаяния в горах с марта по июнь наблюдается вынос с повышенным содержанием взвешенного вещества, достигающим $35\text{--}40 \text{ г/м}^3$. Повторное увеличение его концентрации наблюдается в ноябре и декабре и связано с усилением осадков. В остальные месяцы плюм реки Чорох либо совсем не проявляется на спутниковых изображениях, либо проявляется в виде области, соответствующей области 3 на рис. 4.28а, содержание взвешенного вещества в таком случае не превосходит $8\text{--}10 \text{ г/м}^3$.



Р и с. 4.30. Речные плюмы в виде струй. Фрагмент цветосинтезированного изображения ETM+ Landsat-7 от 15 ноября 2000 г.

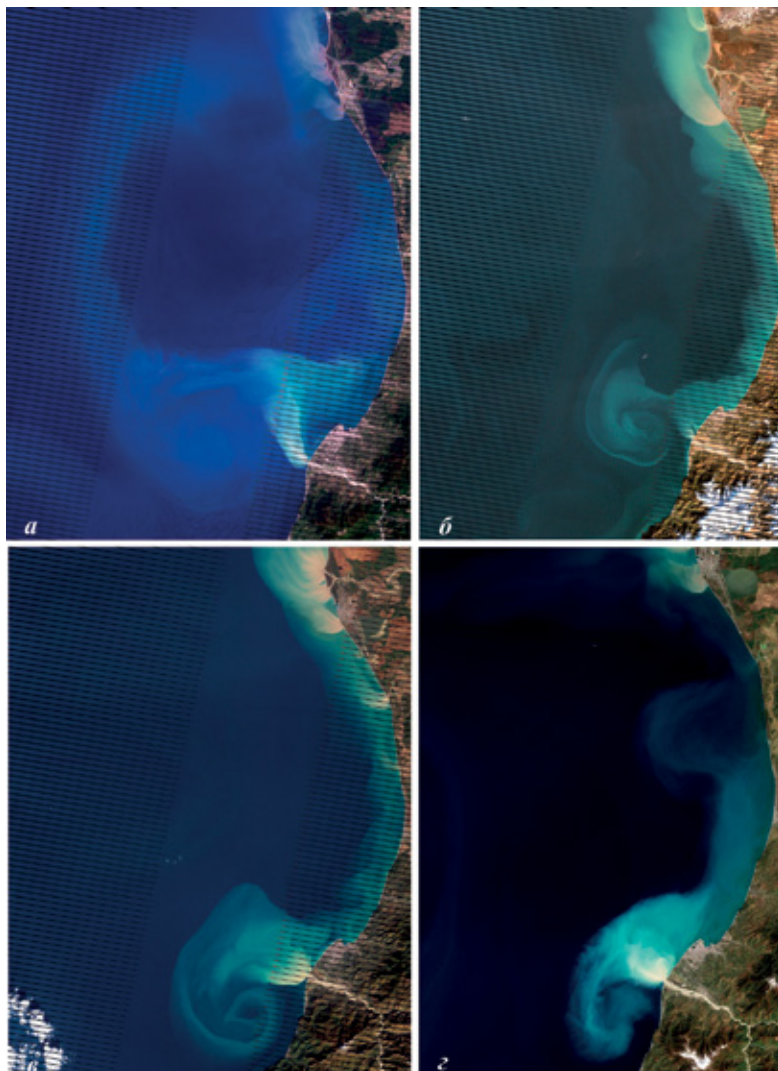
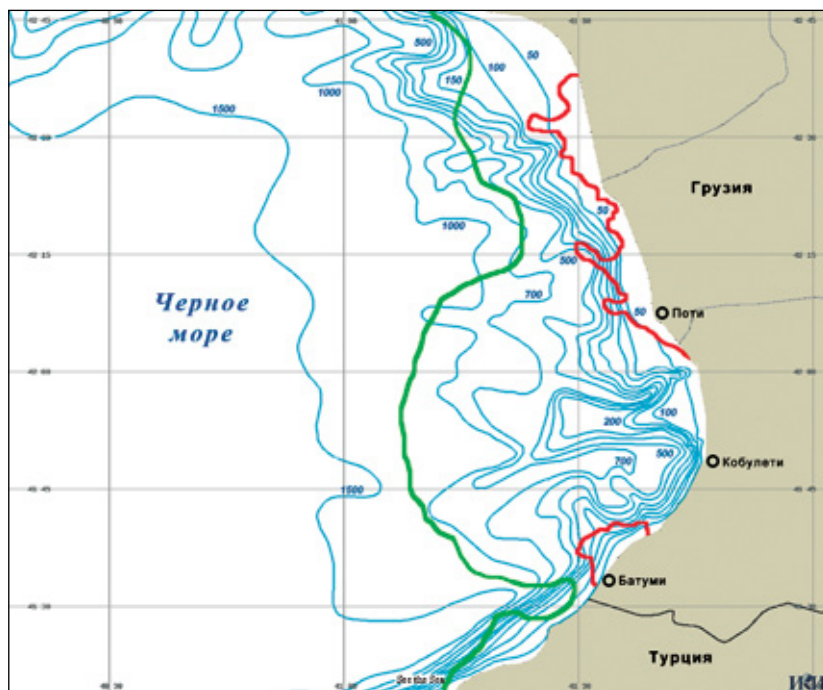


Рис. 4.31. Примеры проявлений плумов реки Чорох в виде вихревых структур на изображениях ETM+ Landsat-7: *a* — 16 мая 2009 г.; *б* — 13 января 2005 г.; *в* — 13 ноября 2005 г.; *z* — 30 апреля 2003 г.

Распространение плумов в прибрежной зоне Чёрного моря происходит в большинстве случаев вправо от устья, вдоль береговой черты, параллельно изобатам, что соответствует направлению на север. Это полностью соответствует модельным описаниям [Журбас и др., 2011; Garvin, 1982, 1987]. Распространение плумов в виде вдольбереговых струй наблюдается при западных ветрах, которые являются господствующими в данном районе. При сильном восточном ветре струи с повышенным содержанием взвешенного вещества распространяются перпендикулярно берегу, взвешенное вещество выносится далеко в море на расстояние 30–50 км (рис. 4.30).



Р и с. 4.32. Области, соответствующие максимальному распространению взвешенных веществ в восточной части Чёрного моря: зелёная линия отмечает границу наибольшего распространения области 3; красная — области 1, согласно классификации, описанной в тексте

Особый интерес представляет образование плюма реки Чорох в виде вихревого диполя. Такого вида диполи наблюдаются в апреле-мае и в ноябре-январе (рис. 4.31). Причём диполь редко бывает симметричным, чаще всего он имеет чёткую циклоническую часть с диаметром 8–10 км и размытую, иногда сильно увеличенную в размерах антициклоническую часть, диаметр которой может достигать 40 км. Такое увеличение антициклонической части можно объяснить генеральным распространением плюма направо от устья. Помимо вдольбереговых струй и вихревых диполей наблюдаются плюмы в виде циклонических вихревых структур и струй, которые порой распространяются на расстояние более 50 км (см. рис. 4.30).

Наши исследования влияния различных факторов на распространение взвешенного вещества, выносимого реками в восточную часть Чёрного моря, показали, что для данного района, который характеризуется резким свалом глубин и в который впадают сильно взмученные горные реки, определяющее значение имеет речной сток. От его интенсивности зависят и форма выноса (например, плюм в виде вихревого диполя у р. Чорох) и размер плюма. Сильный восточный ветер может несколько изменить конфигурацию плюма, способствовать образованию струй. При нагонном западном ветре плюм распространяется вдоль берега вправо от устья.

Одна из важнейших задач — это картографирование ареалов распространения взвешенного вещества и определение площадей с наибольшей его концентрацией. Данная задача решалась на основе карт, получаемых при проведении классификации

для рек, впадающих в восточную часть Чёрного моря (от Риони до Чорох). Оценка площадей делалась для двух областей — первой и третьей. Максимальная площадь первой области (области, ближайшей к устью, с максимальной концентрацией взвешенного вещества) составляет 175 км². Такие размеры характерны для марта-апреля и встречаются в ноябре, т.е. когда вынос наносов всех рек максимален. Максимальная общая площадь акватории, по которой распространяется взвешенное вещество, достигается в апреле-мае 2200 км² (рис. 4.32).

Наши исследования показали эффективность спутникового мониторинга для изучения речных плумов. Совместный анализ спутниковой информации и гидрометеорологических данных позволил оценить влияние различных факторов, в первую очередь ветра, на распространение взвешенного вещества, выносимого реками в восточную часть Чёрного моря.

4.4. ПОДСПУТНИКОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ

Немаловажную часть исследований по выявлению и изучению морских зон экологического риска составляют подспутниковые натурные измерения. Во многом результаты экспедиционных исследований дополняют, систематизируют и уточняют информацию, получаемую со спутников. Важность экспедиционных исследований сложно переоценить, так как подобные работы позволяют провести верификацию бесконтактных методов исследования поверхности Мирового океана, оценить ограничения применения дистанционных методов исследования, а также провести сравнение репрезентативности методов дистанционного зондирования поверхности Мирового океана.

В рамках работы по определению зон экологического риска было проведено восемь серий подспутниковых натурных измерений в период 2013–2016 гг. Основные работы проводились в Чёрном и Балтийском морях в летне-осенний период. В экспедиционных работах принимали участие аспиранты и молодые учёные ИКИ РАН, студенты и аспиранты МГУ имени М. В. Ломоносова. Обработка результатов измерений проводилась участниками проекта РФФИ Назировой К. Р. (ИКИ РАН) и Краюшкиным Е. В. (ИКИ РАН, Компания «Технополь»). Материалы, представленные в данном разделе, базируются на полученных ими результатах.

4.4.1. Методика проведения подспутниковых измерений

В экспедиционных работах применялись различные методики и инструменты океанографических исследований с целью получить максимально разносторонние данные об основных гидрометеорологических характеристиках: прибрежных течениях, термохалинной структуре вод, концентрации взвешенного вещества, параметрах приводного ветра. Для определения параметров течений как в поверхностном слое вод, так и на глубине применялся акустический доплеровский профилограф течений (ADCP) TRDI WorkHorse Sentinel 300 с функцией определения скорости дви-

жения плавсредства (bottom track) и диапазоном профилирования до глубины 130 м. В 2016 г. было проведено дооснащение оборудованием Hemisphere Vector V102 GPS Compass, которое позволяет выполнять измерения на больших глубинах. ADCP позволяет определять скорость и направление течений от поверхности до дна в отдельных дискретных объёмах водной толщи. Прибор способен определять компоненты вектора скорости, используя эффект Доплера, принимая отражённый акустический сигнал от содержащихся в воде частиц. В ходе экспедиционных работ акустический профилограф течений закреплялся на борту маломерного судна излучателем вниз и буксировался вдоль разреза, проводя непрерывные измерения параметров течений. Для привязки измерений использовался стандартный комплект GPS-приёмника, интегрирующий данные о положении системы в общий поток данных. Ограничения акустической методики измерений течений выражаются в том, что ADCP не способен измерять поверхностную часть профиля в пределах 3–5 м в зависимости от настройки, а также придонную часть профиля в пределах ~6 % от диапазона измерений [Лаврова и др., 2014а]. После проведения измерений проводилась процедура фильтрации и осреднения. Получаемое на выходе поле течений даёт представление как о средней скорости и направлении течений в районе исследований, так и об отдельных вариациях поля в определённой части разреза. Инструментальная погрешность измерений вектора скорости течений при помощи ADCP составляет 0,5 % от суммарной скорости плавсредства и скорости течения воды, примерно 1–2 см/с, эта величина принималась за общую погрешность вектора скорости течения. Наряду с измерением течений, ADCP измеряет величину обратного рассеяния звука, которая пропорциональна концентрации звукорассеивающих частиц. Положение и интенсивность звукорассеивающих слоёв характеризует не только гидрофизические, но и биологические условия и процессы, поскольку рассеивание звука происходит также и на фито-зоопланктоне [Зацепин и др., 2014].

Однако использование методики буксировки ADCP имеет и свои недостатки, самый существенный из которых — относительная сложность выполнения океанографических разрезов, сопряжённая с погодными, экономическими и человеческими факторами. Зачастую океанографический разрез может не попасть в наиболее интересную часть региона. Для решения данной проблемы и оптимизации экспедиционных исследований по изучению поля течений одновременно с буксировками ADCP использовались и запуски лагранжевых дрейфтеров. Дрейфтер, как правило, имеет надводную и подводную (парус) части. Для уменьшения влияния ветра на движение дрейфтера, подводная часть дрейфтера по площади сечения намного превосходит надводную часть. Подводный парус может иметь различную площадь, форму и глубину расположения, что определяет тот объём жидкости, о перемещении которого мы получаем данные, используя дрейфтеры. Для позиционирования дрейфтеров в настоящее время активно применяются глобальные навигационные спутниковые системы (GPS). К преимуществам GPS относятся: отсутствие необходимости в прямом наблюдении позиционируемого объекта, высокая частота данных о местоположении, автономность работы (от нескольких суток до месяцев), полное покрытие Мирового океана сигналами GPS, всепогодность наблюдений, компактность и экономичность пользовательской аппаратуры, возможность её объединения с радио-, GSM или спутниковым передатчиком для трансляции координат в режиме реального времени [Сильвестрова и др., 2016]. Использование лагранжевых дрейфтеров даёт возможность

непрерывно получать данные о параметрах течений на определённой глубине в течение длительного промежутка времени, позволяя оценивать динамику вод на больших пространственных масштабах.

Одновременно с изучением поля течения в ходе океанографических работ выполнялась регулярная съёмка термохалинных параметров морских вод при помощи высокоточного CTD-зонда RBR-concerto с частотой вывода данных до 6 Гц и быстродействующими датчиками температуры, электропроводности и давления. При обработке данных измерений CTD-зонда проводилось осреднение данных в пределах 1 м. Солёность рассчитывалась по данным о температуре, электропроводности и давлению воды согласно шкале практической солёности 1978 г. (PSS-78). Температура вод рассчитывалась по международной температурной шкале 1990 г. (ITS-90). Глубина погружения зонда определялась с учётом введения поправки на среднее атмосферное давление данного района [Лаврова и др., 2014а]. В дополнение к съёмке CTD-параметров океанографический зонд был оснащён датчиком Seapoint Turbidity обратного рассеивания на длине волны 700 нм, позволяющим оценивать общую концентрацию взвешенных частиц в воде — мутность воды на океанографических станциях.

Для выявления и определения параметров внутренних волн проводились измерения с помощью заякоренной гирлянды десяти термодатчиков Star-Oddi Starmon mini и DST milli TD. Дискретность измерений составляла 30 с.

Параметры приводного ветра в ходе выполнения океанографических разрезов измерялись при помощи ультразвуковой судовой метеостанции Airmar 150WX, имеющей возможность расчёта истинного ветра по мере движения маломерного судна.

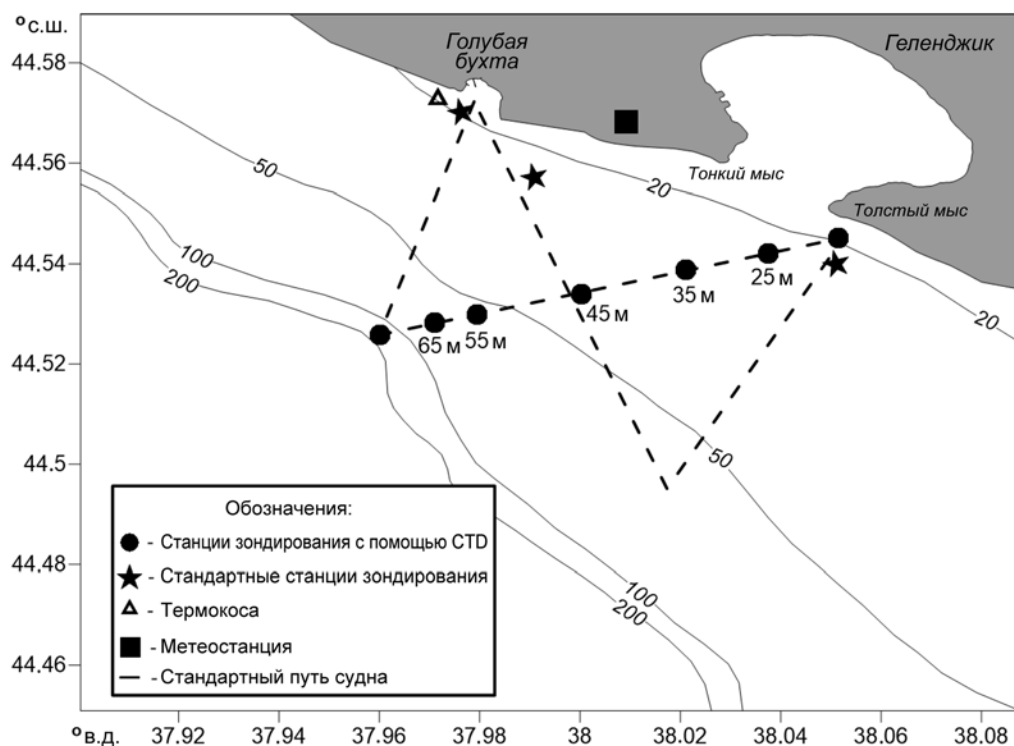
Экспедиционные работы проводились в районе Самбийского полуострова в Балтийском море и на акватории шельфа Чёрного моря вблизи г. Геленджика в пределах границ от траверза Голубой бухты до мыса Толстого. Прибрежная акватория Чёрного моря в районе Южного отделения Института океанологии (г. Геленджик) стала своеобразным подспутниковым полигоном, где проводятся испытания новых приборов, выполняются регулярные наблюдения и измерения различных параметров морской среды. Это вызвано не только тем, что для данной акватории характерно большое разнообразие протекающих в ней процессов, в первую очередь вихревых, но и большим прикладным значением таких наблюдений, в частности для оценки экологического состояния вод и прогноза распространения загрязнений [Булатов и др., 2003б; Зацепин и др., 2008, 2011, 2014, 2016; Лаврова и др., 2013, 2015; Серебряный, Лаврова, 2008; Lavrova, Vocharova, 2006; Lavrova et al., 2008a].

На период проведения натурных измерений проводилось накопление и анализ всей доступной спутниковой информации в видимом, ИК-диапазонах спектров, а также данных спутниковой радиолокации. Проводился также заказ радиолокационной съёмки района эксперимента с высоким пространственным разрешением при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленных на ИСЗ TerraSAR-X, TanDEM-X и Radarsat-2 [Лаврова и др., 2015; Dreschler-Fischer et al., 2014].

Проведение всех подспутниковых измерений в Чёрном море осуществлялось таким образом, чтобы в момент радиолокационной съёмки судно находилось на максимальном удалении от берега, т.е. у свала глубин. В момент пролёта спутника проводилось гидрологическое зондирование, после которого судно следовало к Толстому

мысу (Геленджикская бухта). Маршрут работ корректировался в зависимости от динамической ситуации на полигоне. На разрезе от свала глубин до маяка на Толстом мысе проводились зондирования толщи вод на стандартных горизонтах (65; 55; 45; 35; 25 м). Также измерения проводились на трёх реперных станциях — основных источниках загрязнений: 1) около трубы глубоководного выпуска сточных вод города Геленджика; 2) около строящегося морского причала в районе аэропорта и 3) на входе в Голубую бухту. Отдельные специальные работы проводились по краю Геленджикской бухты, чтобы исследовать вынос вод из неё. Во всё время движения судна проводилось непрерывное зондирование с помощью ADCP. Стандартная схема работ представлена на рис. 4.33. В зависимости от продолжительности экспедиционных исследований осуществлялось 10–15 выходов в море. Помимо морских работ, производились визуальные наблюдения и оптическая съёмка с высокого берега. Во время пролёта спутников фиксировались и описывались все доступные параметры морской поверхности: волнение, наличие slickов, расположение судов; а также измерялись скорость и направление ветра. Наблюдения производились синхронно с выходами в море, что способствовало улучшению качества работ в море и анализа снимков в дальнейшем.

Основные работы проводились в сентябре-октябре, в наиболее интересный период с точки зрения наличия гидродинамических процессов.



Р и с. 4.33. Схема экспериментальных работ

4.4.2. Задачи подспутниковых экспериментов

Основными задачами экспериментальных работ являлись:

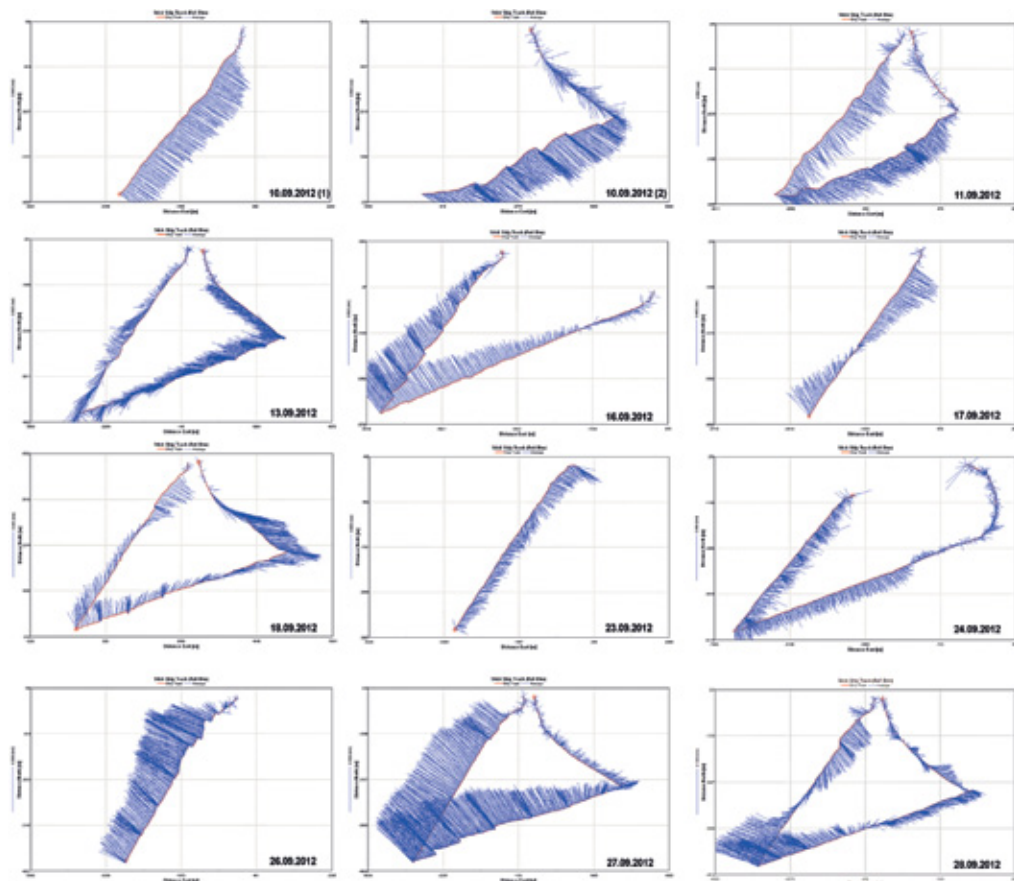
- Получение данных контактных измерений параметров приводного слоя атмосферы (температура, влажность, скорость и направление ветра) и моря (температура и солёность воды, параметры волнения).
- Измерение с помощью ADCP с маломерного судна параметров прибрежных течений (скорость, направление), выявление областей повышенного акустического рассеяния, фронтальных зон, вихревых структур и внутренних волн.
- Измерения температурных профилей на разных горизонтах с помощью косы термодатчиков с целью определения параметров внутренних волн.
- Определение связи между гидродинамическими процессами, происходящими в толще воды, с их поверхностными проявлениями.
- Выявление источников загрязнения морской среды.
- Изучение влияния гидродинамических процессов на распространение загрязнений.
- Верификация результатов дистанционных исследований из космоса с помощью синхронных подспутниковых измерений.

Район экспедиционных работ известен большой изменчивостью течений. Их направление и скорость могут существенно меняться даже в течение суток. Регулярно в осенний период наблюдаются противотечения (течение, распространяющееся на юго-восток, противоположное по направлению Основному черноморскому течению), что зачастую свидетельствует о прохождении антициклонических вихрей. Диаметр таких вихрей составляет 7–12 км. Продолжительность «жизни» субмезомасштабных прибрежных вихрей составляет не более 2–3 сут. Максимальный срок прохождения антициклонического вихря в районе экспериментальных работ, который был выявлен в октябре 2006 г., составил 5 сут [Серебряный, Лаврова, 2008].

Задачами экспериментальных работ в части изучения вихревых структур являлись:

- выявление наличия противотечений, т. е. течений, направление которых противоположно Основному черноморскому течению (ОЧТ), которое является основным элементом крупномасштабной циркуляции вод Чёрного моря и распространяется по периферии моря в циклоническом направлении со стрежнем, расположенным в среднем над континентальным склоном;
- установление связи между положением сликовых полос, детектируемых на РЛИ с выявленными на записях ADCP проявлениями противотечений, которые могут быть связаны с прохождением вихрей;
- определение характера изменения течений по глубине;
- изменение положения термоклина при прохождении вихря.

Наиболее характерный пример изменчивости течения представлен на рис. 4.34. Как видно на рисунке, юго-восточное направление течения (противотечение) было зафиксировано на семи разрезах. Трижды — 17, 18 и 28 сентября 2012 г. — вдоль разреза наблюдается смена течения с юго-восточного у берега на северо-западное на некотором удалении от берега.



Р и с. 4.34. Пример изменчивости вдольберегового течения. Результаты измерения течений на разрезах с помощью ADCP в период с 10 по 28 сентября 2012 г. [Лаврова и др., 2013]

Есть все основания считать, что здесь мы наблюдаем прохождение мелкомасштабных антициклонических вихрей (направление вращения по часовой стрелке). Причём для этих случаев можно достаточно точно оценить диаметр вихря. Так, например, диаметр вихря, измеренный 17 сентября, составил примерно 8 км. Данная оценка основана на предположении, что за радиус можно взять расстояние от точки, ближайшей к береговой черте, где наблюдается юго-восточное течение, до точки, где происходит смена его направления. Проведённые в течение трёх дней измерения позволили проследить формирование и распространение данного антициклонического вихря. Интересно отметить, что при совместном анализе радиолокационных данных и данных ADCP (рис. 4.35) в области смены направления течения находилась слико-вая полоса.

Одна из важнейших задач подспутниковых наблюдений — выявление источников загрязнений водной среды и исследование влияния прибрежных течений на их распространение. В районе проведения экспедиционных работ потенциальными

источниками загрязнения морской среды являются: несанкционированные сбросы с судов, находящихся на якорной стоянке Дооб (внешний рейд порта Новороссийск) загрязнённых вод; аварийные сбросы на глубоководном выпуске сточных вод г. Геленджика; вынос мутных вод рекой Ашамба после ливневых дождей; работы по строительству морского причала в районе аэропорта г. Геленджика и вынос загрязнённых вод из Геленджикской бухты. Основной вклад вносят первые два источника загрязнений. Загрязнения, связанные с сильным паводком на реке Ашамба, преимущественно распространяются по акватории Голубой бухты и редко выходят за её пределы.

Рассмотрим некоторые примеры влияния прибрежных течений на распространение антропогенных загрязнений в районе экспериментальных работ.

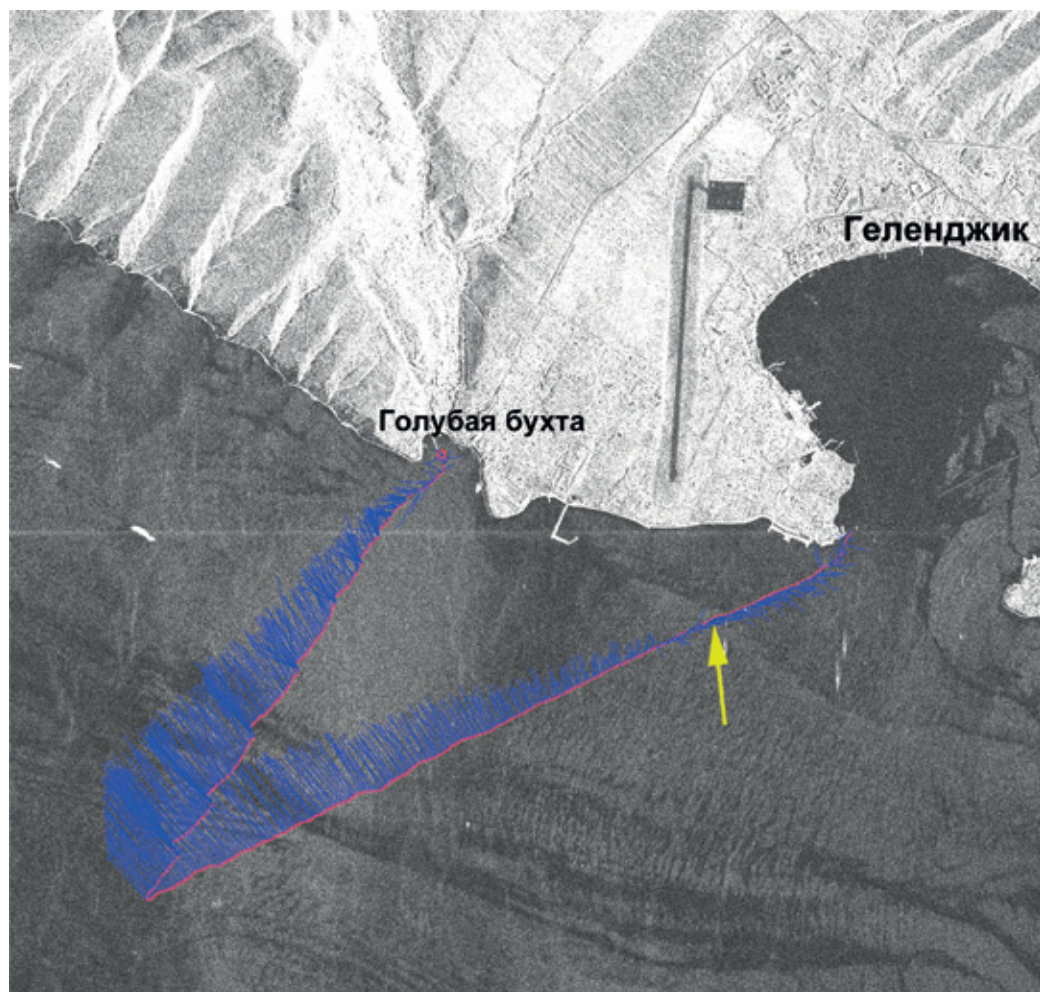
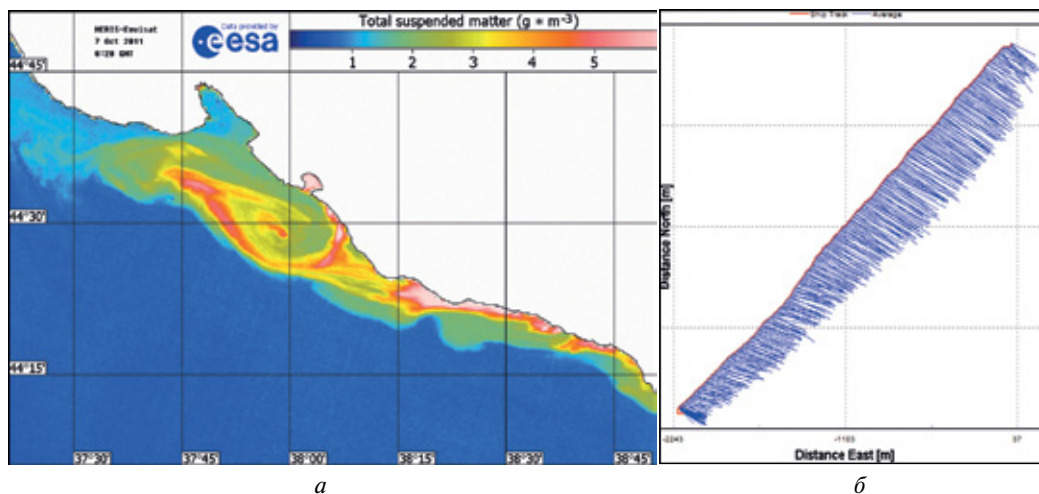


Рис. 4.35. Фрагмент РЛИ TerraSAR-X от 16.09.2012 г. Синим цветом отмечены скорость и направление течения по данным ADCP в период спутниковой съёмки. Стрелка указывает на слик, расположенный в области смены направления течения [Лаврова и др., 2013]

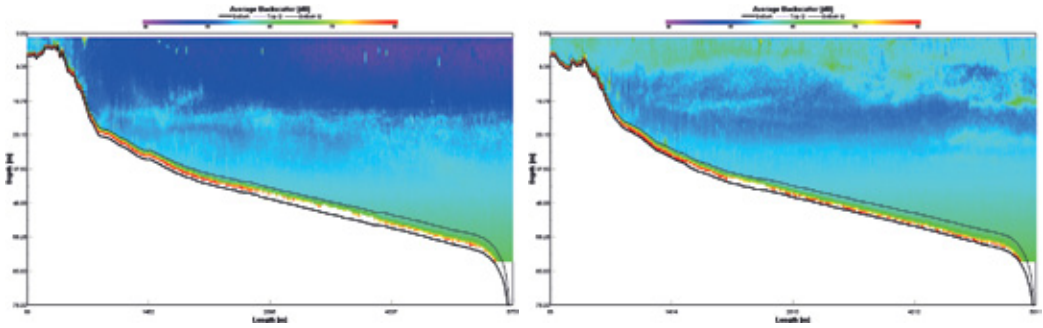
4.4.3. Исследование влияния прибрежных течений на распространение антропогенных загрязнений

Один из наиболее ярких примеров влияния вихревых структур на распространение загрязнений был изучен нами во время проведения подспутниковых измерений в октябре 2011 г. [Калашникова и др., 2013; Lavrova et al., 2013].

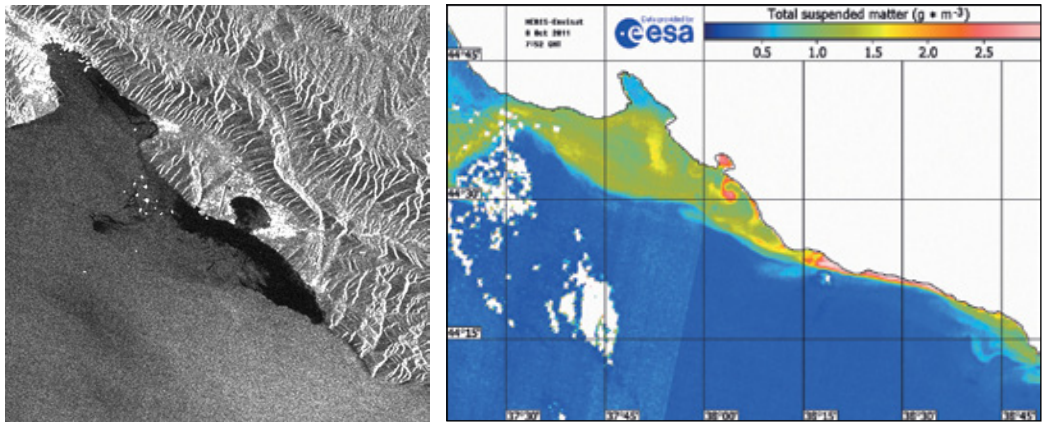
Сильные ливневые дожди, прошедшие 5 октября 2011 г., когда выпало 33 мм осадков, привели не только к усилению стока мутных речных вод, но и, по всей видимости, переполнению резервуаров очистных сооружений г. Геленджика на Толстом мысу, и аварийному сбросу сточных вод в море. Следует заметить, что аварийные сбросы сточных вод на устаревших очистных сооружениях г. Геленджика явление нередкое, и их последствия регулярно наблюдаются на спутниковых изображениях [Лаврова, Митягина, 2012; Лаврова и др., 2011а]. О резком повышении концентрации взвешенных веществ в районе Толстого мыса свидетельствовали и данные, полученные из космоса, например на карте концентрации взвешенного вещества, построенной по данным сенсора MERIS Envisat, от 7 октября 2011 г. (рис. 4.36а) видно, что значения концентрации превышают 6 г/м^3 . Загрязнения разносятся на большие расстояния от места сброса, захваченные антициклоническим вихрем, размеры которого составили: диаметр большой оси — 35 км; малой — 16 км. Прибрежную часть этого вихря удалось зафиксировать с помощью ADCP, во время проведения 3,3-километрового разреза по акватории шельфа до глубины 35 м (рис. 4.36б), на котором измерено довольно сильное, до 0,3–0,4 м/с юго-восточное течение в прибрежной километровой зоне, что свидетельствует о прохождении антициклонического вихря достаточно больших размеров.



Р и с. 4.36. Распространение загрязнённых вод под действием антициклонического вихря 7 октября 2011 г.: *a* — карта концентрации взвешенного вещества, построенная по данным сенсора MERIS Envisat; *б* — течения на разрезе по данным ADCP, юго-восточное направление свидетельствует о наличии антициклонического вихря [Lavrova et al., 2013]



Р и с. 4.37. Картины обратного рассеяния на сечениях поперёк шельфа до шторма (28 сентября 2011 г.) — слева, и после шторма (8 октября 2011 г.) — справа [Lavrova et al., 2013]



Р и с. 4.38. Распространение загрязнённых вод 8 октября 2011 г.: *a* — фрагмент радиолокационного изображения ASAR Envisat; пространственное разрешение 150 м. Тёмная область соответствует району повышенного загрязнения морской поверхности; *б* — карта концентрации взвешенного вещества, построенная по данным сенсора MERIS Envisat [Lavrova et al., 2013]

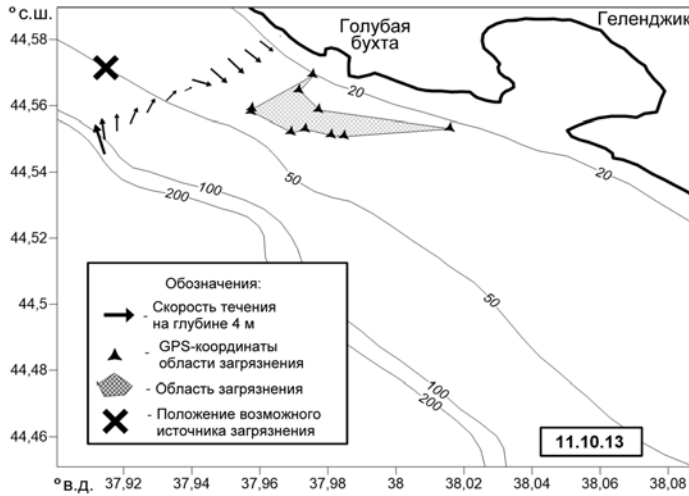
Данные ADCP позволили сравнить картины объёмного обратного рассеяния на разрезах до начала периода штормовой погоды (съёмка от 28 сентября) и после штормового периода (съёмка от 8 октября). На рис. 4.37 приведены соответствующие разрезы. На разрезе до штормовой погоды хорошо различимо положение термоклина, находящегося на глубине 20–21 м, который разделяет толщу на две контрастные области — верхнюю, с относительно слабым рассеянием (значения коэффициента обратного рассеяния в пределах 46–50 дБ) и нижнюю — со значительным рассеянием (56–59 дБ). После шторма картина обратного рассеяния акустического сигнала кардинальным образом изменилась. Положение заглубившегося термоклина до 22–27 м видно нечётко, в то время как зона максимума обратного рассеяния (со значениями коэффициента рассеяния 61–67 дБ) переместилась в приповерхностные слои моря, занимая горизонты от поверхности до глубин 8–10 м и простираясь непосредственно

от береговой зоны на расстояние около 3 км в море. На большем удалении от берега зона повышенного обратного рассеяния заглубилась до 18–20 м, приняв пятнистый характер распределения коэффициента обратного рассеяния по разрезу. Ниже этой зоны располагалась вода со значениями коэффициента рассеяния в пределах 55–57 дБ. На РЛИ, полученном радиолокатором ASAR Envisat 8 октября, район загрязнённых вод проявляется в виде области пониженного рассеяния (тёмного цвета) вдоль береговой черты в районе Геленджикской и Голубой бухт и занимает площадь около 48 км² (рис. 4.38а). В то же время, основываясь на карте концентрации взвешенного вещества, построенной по данным MERIS Envisat также от 8 октября, можно сделать вывод о том, что загрязнённые воды распространились на гораздо большее расстояние под действием вдольберегового течения (рис. 4.38б).

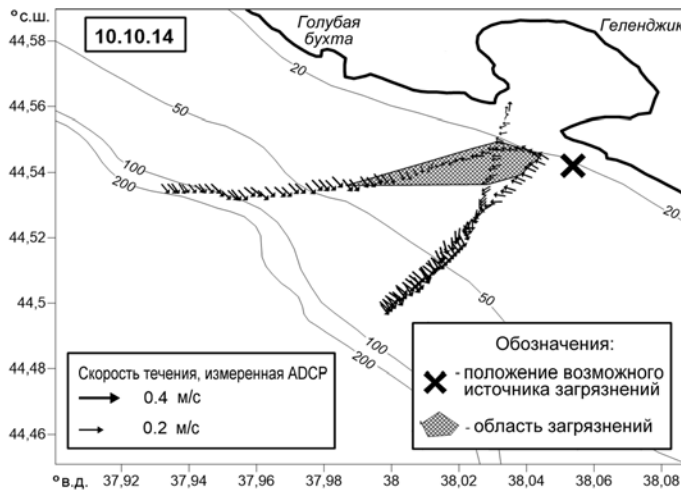
Второй пример относится к измерениям 2013 г. Во время проведения стандартных измерений с маломерного судна 11 октября 2013 г. было обнаружено маслянистое пятно на поверхности воды (рис. 4.39). Обойдя по периметру район загрязнений и определив его границы с помощью GPS, мы установили, что площадь загрязненной области составляла около 10 км² (рис. 4.40). Измерения параметров течения, проведенные с помощью ADCP, показали, что 11 октября в районе работ наблюдался антициклонический вихрь. Направление течения в районе выявленного загрязнения было на юго-восток. Основываясь на результатах измерений течения и на форме пятна, мы пришли к выводу, что источником загрязнения являлся сброс с судна загрязненных вод. Судя по характеру распространения пятна, виновником загрязнений являлся один из двух танкеров, перевозивших сырую нефть: “Vigna” или “Absheron”. Наши визуальные наблюдения были подтверждены и данными AIS.



Р и с. 4.39. Загрязнение морской поверхности, обнаруженное при проведении измерений с маломерного судна 11 октября 2013 г. [Nazirova et al., 2015]



Р и с. 4.40. Схема распространения загрязнений 11 октября 2013 г. [Nazirova et al., 2015]

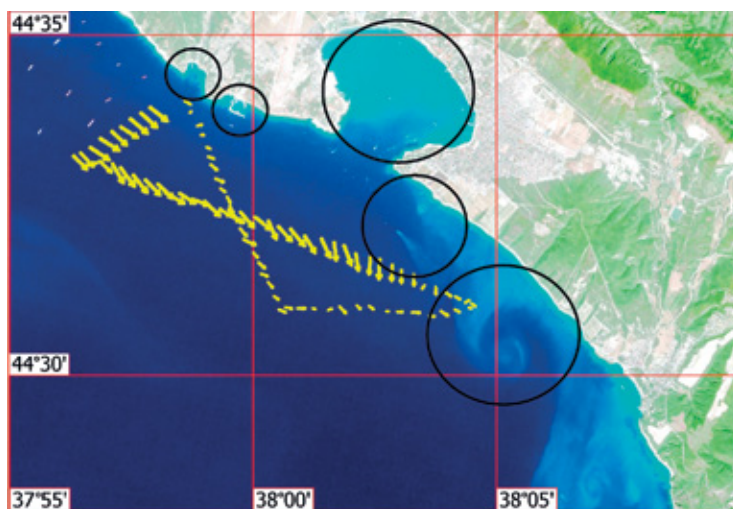


Р и с. 4.41. Схема распространения загрязнений 10 октября 2014 г. [Nazirova et al., 2015]

Подобная ситуация наблюдалась и в октябре 2014 г. Во время проведения измерений 10 октября 2014 г. на траверзе Геленджикской бухты было выявлено загрязнение морской поверхности на площади более 10 км² (рис. 4.41). Измерения показали, что в данном районе наблюдался циклонический мелкомасштабный вихрь, и он способствовал распространению загрязнения в северо-западном направлении (вдоль берега) с поворотом на юг по мере удаления от береговой черты. Наиболее вероятным источником загрязнений являлось распространение плохо очищенных сточных вод из очистных сооружений в районе Толстого мыса.



Р и с. 4.42. Вихревые структуры на цветосинтезированном изображении MSI Sentinel-2A от 13 сентября 2016 г. (обработка Соловьева Д. М., МГИ РАН, Севастополь)



Р и с. 4.43. Фрагмент цветосинтезированного изображения MSI Sentinel-2A за 13 сентября 2016 г. Жёлтые стрелки — среднее направление течения по данным ADCP за 14 сентября 2016 г. [Назирова и др., 2016]

Район Толстого мыса, где в море уходит труба с очистных сооружений, один из постоянных объектов нашего как спутникового, так и подспутникового мониторинга. По техническим нормам сброс сточных вод должен производиться по глубоководному выпуску, оголовок которого должен находиться на расстоянии более 2 км от берега на глубине около 30 м. Из-за неисправности трубы и аварийных сбросов неочищенная или плохо очищенная вода попадает в море вблизи берега. Учитывая характер прибрежных течений, можно ожидать распространение загрязнений, как вдоль берега (как в описанных выше примерах), так и в саму Геленджикскую бухту — один из крупнейших рекреационных центров на Чёрном море. К сожалению, подобных примеров можно привести множество. Практически каждый год выявляются достаточно большие загрязненные области. При обнаружении подобных загрязнений нами по радию передается подробная информация в соответствующие службы. Принимаются ли какие-то конкретные меры против нарушителей — нам неизвестно.

В заключение хотелось бы остановиться на примере, который свидетельствует, что не все задачи пока находят решения.

В частности, во время проведения подспутниковых измерений в сентябре 2016 г. на изображениях видимого диапазона отчётливо проявились вихревые структуры разных масштабов. Одной из задач экспериментальных работ стала верификация спутникового изображения MSI Sentinel-2A, полученного 13 сентября 2016 г. (рис. 4.42). Его фрагмент и наложенная поверх запись ADCP со средними значениями течения от поверхности до дна представлена на рис. 4.43. Области повышенной цветности, выделенные чёрными окружностями, представляли наибольший интерес. А именно: Голубая бухта, район строящегося порта, Геленджикская бухта, район над трубой очистных сооружений г. Геленджика, вихревая структура в поле цветности. Для анализа этого спутникового изображения были использованы данные подспутниковых измерений 13 и 14 сентября.

Как показал анализ данных измерений *in-situ*, выявленные на спутниковом изображении структуры повышенной цветности не проявились ни в данных датчика мутности, ни в обратном рассеянном акустическом сигнале ADCP [Назирова и др., 2016]. Возможно, выявленные на спутниковом изображении вихревые структуры являются квазидвумерными, т.е. распространяются только в тонком приповерхностном слое. Измерения же имеющимися у нас приборами начинаются с глубины 2 м. Вопрос остаётся открытым и будет решаться в ходе будущих экспедиций.

4.5. ЗОНЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА В ЧЁРНОМ МОРЕ

Результаты нашего многолетнего спутникового мониторинга Чёрного моря позволили определить основные источники загрязнений и механизмы их распространения. На основе данных дистанционного зондирования были определены устойчивые зоны экологического риска, т.е. районы, наиболее подверженные плёночным загрязнениям антропогенного и естественного происхождения, «вредоносным» цветениям водорослей и повышенным концентрациям взвешенного вещества.



Рис. 4.44. Зоны экологического риска в Чёрном море, выявленные на основе данных спутникового дистанционного зондирования: 1 — судходная трасса Стамбул-Варна; 2 — судходная трасса Стамбул-Констанца; 3 — судходная трасса Стамбул-Одесса; 4 — судходные трассы Стамбул — Керченский пролив и Стамбул-Новоросийск; 5 — судходные трассы, ведущие в порты Грузии; 6 — акватория вблизи дельты Дуная; 7 — район интенсивного цветения водорослей на северо-западном шельфе; 8 — Севастопольская бухта; 9 — Керченский пролив; 10 — Цемесская бухта; 11 — Геленджикская бухта; 12 — порт Туапсе; 13 — акватория вблизи Сочи; 14 — район интенсивных метановых сипов; 15 — прибрежная зона крайней восточной части Чёрного моря

Для Чёрного моря устойчивыми зонами экологического риска являются (рис. 4.44):

- Основные судходные трассы, вдоль которых регулярно происходит несанкционированный сброс вод, содержащих нефтепродукты. К ним относятся судходные трассы: Стамбул-Варна, Стамбул-Констанца, Стамбул-Одесса, Стамбул-Керченский пролив, Стамбул-Новоросийск, Стамбул-Туапсе, судходные трассы, ведущие в порты Грузии (см. рис. 4.44, районы 1–5).
- Район дельты Дуная: повышенное содержание взвешенного вещества, загрязнения вдоль судходных трасс вблизи берега (см. рис. 4.44, район 6).
- Северо-западный шельф: самая мелководная часть Чёрного моря наиболее подвержена влиянию речного стока (80 % всего стока в Чёрное море): Дунай, Днестр, Южный Буг, Днепр, Ингул; интенсивное цветение фитопланктона, нефтяные загрязнения вблизи портов (см. рис. 4.44, район 7).
- Акватории портов, особенно, где функционируют нефтеналивные терминалы: крупные порты Болгарии, Турции, Румынии и Украины. В российской части Чёрного моря наибольшему загрязнению подвергается акватория в районе портов Севастополь, Новоросийск (Цемесская бухта) и Туапсе (см. рис. 4.44, районы 8, 10, 12).
- Керченский пролив, где регулярно наблюдается повышенная концентрация взвешенного вещества, вызванная работами по строительству Керченского моста; многочисленные плёночные загрязнения у выносных причалов Таманского перегрузочного комплекса, связанные с проведением технологических

- операций по перекачке нефти, нефтепродуктов и синтетических масел (рис. 4.44, район 9).
- Районы якорных стоянок вблизи крупных портов и в черноморском предпроливье Керченского пролива, где происходит перевалка грузов с одного типа судна на другое (см. рис. 4.44, районы 9 и 10).
 - Геленджикская бухта: акватория вблизи крупного туристического центра с инфраструктурой не соответствующей повышенному туристическому потоку; сброс ливневой канализации практически прямо в море; наличие на Толстом мысу устаревшего глубоководного выпуска сточных вод. Слабый водообмен в полузакрытой бухте не способствует её самоочищению (см. рис. 4.44, район 11).
 - Район Большого Сочи: огромная рекреационная нагрузка, крупнейший российский курорт на Чёрном море. Одним из источников загрязнения также являются многочисленные промышленные предприятия, расположенные вдоль рек Мзымта и Сочи. В период половодья резко повышается концентрация взвешенного вещества в районе выносов рек Пшада, Вулан, Туапсе, Битха, Сочи, Кудепста, Мзымта (см. рис. 4.44, район 13).
 - Район естественных выходов углеводородов со дна в юго-восточной части Чёрного моря. Площадь акватории, имеющей высокую вероятность загрязнения плёнками в результате естественных нефтепроявлений, составляет около 850 км². Кроме того, углеводородным загрязнениям подвержены морское дно и нижние слои водного столба в окрестности естественных источников (см. рис. 4.44, район 14).
 - Восточная часть Чёрного моря: нефтяные загрязнения как антропогенного, так и естественного происхождения, особенно вблизи портов Батуми и Поти. Повышение содержания взвешенного вещества, связанное с выносами многочисленных рек, в первую очередь Риони и Чорох (см. рис. 4.44, район 15).

Глава 5

КАСПИЙСКОЕ МОРЕ

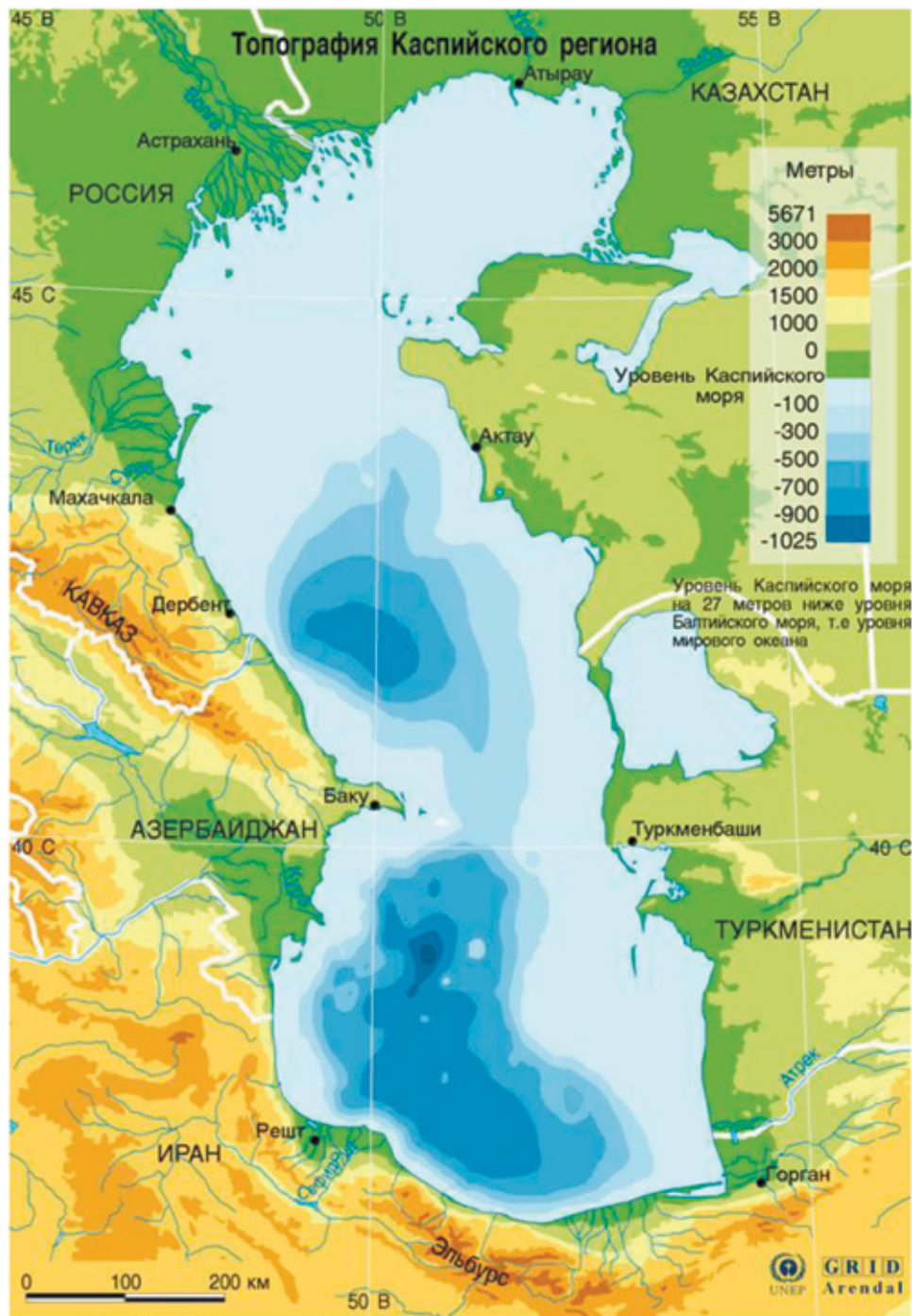
5.1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Каспийское море — крупнейший на планете внутриматериковый бессточный водоём, уровень которого лежит ниже Мирового океана. Площадь водосборного бассейна составляет 3,5 млн км². Каспийское море вытянуто в меридиональном направлении и расположено между 36°33′ и 47°07′ с. ш. и 45°43′ и 54°03′ в. д. (рис. 5.1). Протяжённость моря по меридиану около 1200 км, максимальная ширина — 435 км, средняя ширина — 310 км. Площадь акватории моря при отметке уровня –27,5 м в балтийской системе (БС) составляет 386,4 тыс. км². При современном уровне моря около –27,0 м в БС площадь его акватории равна 392,6 тыс. км², а объём воды составляет 78,65 тыс. км³. Средняя глубина моря равна 208 м, а максимальная — 1025 м [Гидрометеорология..., 1992а; Зонн и др., 2015б; Kostianoy, Kosarev, 2005].

Исходя из морфологических особенностей, Каспийское море принято делить на три части: Северный, Средний и Южный Каспий — которые разделены Мангышлакским и Апшерон-Прибалханским порогами соответственно. Условная граница между северной и средней частями проходит по линии о. Чечень — м. Тюб-Караган, между средней и южной — по линии о. Жилой — м. Куули. Дельта Волги, западное побережье Северного и частично Среднего Каспия (до устья р. Самур) принадлежат Российской Федерации. Берега здесь сильно изрезаны, донный рельеф осложнён наличием множества банок и островов, в число которых входит самый большой на Каспии о. Чечень [Гидрометеорология..., 1992а; Зонн и др., 2015б].

Шельф Каспийского моря в среднем ограничен глубинами около 100 м. Материковый склон, который начинается ниже бровки шельфа, заканчивается в средней части примерно на глубинах 500–600 м, в южной части, где он очень крутой, на 700–750 м. У западного побережья шельф узкий, средняя ширина его 40 км. Ещё более узкий шельф у южного побережья, где глубины около 400 м находятся в 5–10 км от берега. У восточного побережья шельф более обширный, средняя ширина его около 130 км [Гидрометеорология..., 1992а].

Северная часть моря мелководная, средняя ее глубина 5–6 м, максимальные глубины 15–20 м расположены на границе со средней частью моря. Рельеф дна осложнён наличием банок, островов и бороздин.



Р и с. 5.1. Карта Каспийского моря

Средняя часть моря представляет собой обособленную котловину, область максимальных глубин которой — Дербентская впадина — смещена к западному берегу. Средняя глубина этой части, моря 190 м, наибольшая — 788 м. Западный склон Дербентской впадины узкий и крутой, восточный склон сильно растянут. Дно впадины представляет собой слабонаклоненную равнину с глубинами в основном от 400 до 600 м [Гидрометеорология..., 1992а].

Южная часть моря отделена от средней Апшеронским порогом, являющимся продолжением Главного Кавказского хребта. Глубины над этим подводным гребнем не превышают 180 м. Наиболее глубоководная часть Южнокаспийской котловины с максимальной для моря глубиной 1025 м расположена восточнее дельты Куры. Над дном котловины поднимаются несколько подводных хребтов высотой до 500 м.

Берег Каспийского моря в северной его части сильно изрезан заливами (Кизлярский, Аграханский, Мангышлакский), полуостровами (Аграханский, Бузачи, Тюб-Караган, Мангышлак) и множеством мелководных бухт. Наиболее крупными островами в северной части моря являются Тюлений и Кулалы. Обширная дельта Волги состоит из большого количества мелких островков и протоков, что делает береговую линию в этой части моря весьма изрезанной. Средний Каспий имеет более ровную береговую линию. На западном побережье далеко в море выклинивается Апшеронский полуостров, находящийся на границе Среднего и Южного Каспия. Мористее полуострова расположены острова и банки Апшеронского архипелага, из которых наиболее крупный о. Жилой. На восточном берегу выделяется залив Кара-Богаз-Гол и Казахский залив с бухтой Кендерли, а также несколько мысов: Песчаный, Ракушечный, Суэ. В Южном Каспии, южнее Апшеронского полуострова располагаются острова Бакинского архипелага: Булла, Дуванный, Обливной, Свиной и др. На восточном берегу расположены заливы — Туркменбаши (Красноводский) и Туркменский, а вблизи от него — о. Огурчинский [Гидрометеорология..., 1992а; Зонн и др., 2015б].

Особенности гидрометеорологического режима Каспийского моря определяются географическим положением моря на стыке Европы и Азии. Климатические условия Каспийского региона обусловлены влиянием: холодных арктических воздушных масс, поступающих с севера; влажных морских, приходящих из Восточной Атлантики; сухих континентальных — из Казахстана, и тёплых тропических — со Средиземного моря и Ирана. Известно несколько типизаций синоптических атмосферных процессов над Каспийским морем, которые выделены по траекториям движения барических образований [Гидрометеорология..., 1992а]. Синоптические условия над акваторией Каспийского моря определяются частой сменой воздушных масс во все сезоны года. Поле атмосферного давления в отдельных районах Каспийского моря зависит от сезонных изменений циркуляции над Евразией и локальных атмосферных процессов над всем регионом. Зимой наибольшего развития по площади и интенсивности над Азиатским континентом достигает область высокого давления — Центральноазиатский максимум. Он расположен почти над всей Азией, имеет в центре давление 1040 гПа, и один из его гребней ориентирован на Каспий. Исландским минимумом объясняются циклоны и ложбины, перемещающиеся с запада на юг европейской части России и Северный Кавказ и формирующие области низкого давления над акваторией Каспийского моря. Среднемесячные многолетние январские значения атмосферного давления над Северным и Средним Каспием составляют

1022–1023 гПа и на 1 гПа меньше над южным Каспием [Гидрометеорология..., 1992a; Kostianoy, Kosarev, 2005].

Весной интенсивность Центральноазиатского максимума значительно уменьшается и его центральная часть в апреле очерчивается изобарой 1020 гПа. Одновременно снижается и интенсивность Исландского минимума. Каспий, по-прежнему, остаётся под воздействием юго-западной периферии Сибирского максимума, хотя сюда уже нередко выходят области повышенного давления, перемещающиеся от Азорского максимума. Среднегодовое значения атмосферного давления в апреле составляют 1015–1017 гПа [Гидрометеорология..., 1992a].

Летом над Азиатским континентом располагается обширная область низкого давления с основными центрами, расположенными над северо-западом Индии (998 гПа) и Персидским заливом (995 гПа). Азорский максимум увеличивается по интенсивности и по площади, и вместе с многоцентровой азиатской депрессией определяет циркуляцию воздушных масс над Каспийским морем. В июле атмосферное давление над Северным и Средним Каспием обычно составляет 1009–1010 гПа [Гидрометеорология..., 1992a].

Осенью снова развиваются Центральноазиатский максимум и Исландский минимум. Интенсивность Азорского максимума значительно ослабевает и регион всё больше подвержен влиянию юго-западной периферии Сибирского максимума. Среднегодовое значения атмосферного давления в октябре составляют 1017–1020 гПа на юге и 1021–1023 гПа на остальной акватории Каспийского моря [Гидрометеорология..., 1992a]. Среднегодовые значения атмосферного давления над акваторией Каспийского моря составляют 1014–1018 гПа, увеличиваясь к северу. Как было показано выше, в течение года давление зимой повышается, а летом понижается. Амплитуда сезонной изменчивости атмосферного давления составляет 10–12 гПа. Суточные колебания атмосферного давления незначительны и в среднем за год составляют 0,5–1,0 гПа, при этом они больше выражены в зимнее время, чем в летнее. Межсуточная изменчивость атмосферного давления в холодный период года не превышает 23 гПа, а в тёплый — 10 гПа. Резкие изменения атмосферного давления могут наблюдаться при прохождении глубокого циклона или мощного антициклона. Особенно большие изменения давления происходят в районе Апшеронского полуострова, так как здесь наблюдается наибольшая изменчивость атмосферных процессов [Гидрометеорология..., 1992a].

Разнообразие ветровых условий на Каспии обусловлено его большой меридиональной протяжённостью, различиями в физико-географических условиях побережья и преобладанием различных типов атмосферной циркуляции в разных районах. В работе [Гидрометеорология..., 1992a] на основе анализа характеристик ветра, сильных и жёстких штормов приведено районирование Каспия по преобладающему ветру. Основным критерием для такого районирования моря по ветру послужила обеспеченность скорости ветра 15 м/с. Режим сильных и штормовых ветров в конкретном районе формируется в зависимости от характера циркуляции атмосферы и рельефа местности. В Среднем и Южном Каспии наиболее сильные штормовые ветра наблюдаются в районах Апшеронского полуострова, Махачкалы и Форт-Шевченко, где особенно проявляются орографические эффекты. Реже отмечается штормовая деятельность на Северном Каспии, а также в юго-восточном и юго-западном районах моря. Сильные штормы (скорость ветра >25 м/с) над Каспийским

морем характерны только для северо-западного, юго-восточного и северного (или северо-восточного) типов полей ветра [Лебедев, Костяной, 2005; Kostianoy, Kosarev, 2005].

Для северной части моря характерно преобладание восточных и юго-восточных ветров большую часть года. В средней части господствуют ветры северо-западного и юго-восточного направлений, в районе Апшеронского полуострова, вследствие орографического эффекта, — ветры северного и южного направлений. В южной части моря, на юго-западе преобладают северные и северо-восточные ветры, на крайнем юго-востоке зимой преобладают северо-западные ветры, летом — юго-восточные. Над морем преобладают ветры со скоростями до 10 м/с (80–90 %) [Лебедев, Костяной, 2005; Kostianoy, Kosarev, 2005].

Каспийское море относится к морям с сезонным ледовым покровом и отличается большой пространственно-временной неоднородностью развития ледовых процессов [Гидрометеорология..., 1992а; Kostianoy, Kosarev, 2005]. Разнообразие ледовых условий в разных частях моря обусловлено его большой меридиональной протяжённостью и существенно различными климатическими условиями. В Северном Каспии ежегодно устанавливается достаточно мощный и устойчивый ледяной покров. Уже в середине ноября лед появляется на северо-восточных мелководьях, затем в северной прибрежной зоне и постепенно продвигается в мористые районы. Наибольшее распространение ледяной покров получает в феврале, покрывая фактически всю северную часть моря. Таяние льда обычно начинается в марте и происходит более интенсивно (за месяц), чем его нарастание. Характер ледовых условий меняется от года к году в зависимости от термического и динамического факторов. В тёплые зимы льдом покрывается только прибрежная часть, а в суровые зимы — вся северная часть моря. Динамический фактор (ветер, волнение, течения) существенно влияет на состояние ледяного покрова, поскольку происходит взлом неподвижного льда, в результате которого резко уменьшается площадь припая и увеличивается площадь плавучего льда. Припай занимает сравнительно узкую полосу шириной 10–30 км. Его средняя толщина возрастает от 20 см на западе до 50 см на северо-востоке моря, но в аномально холодные зимы может достигать и 90 см [Косарев, 1975]. Толщина дрейфующего льда несколько меньше, чем припая. Этот лёд легко торосится, причём высота торосов может превышать 2 м. Интенсивное образование торосов может приводить к появлению так называемых «стамух», сидящих на грунте. Стамухи возвышаются над поверхностью льда на 2–4 м, а местами на 6 м и более [Гидрометеорология..., 1992а]. В экстремально ледовитые зимы часто происходит вынос плавучего льда из Северного Каспия в Средний вдоль западного побережья до Махачкалы и далее на юго-восток вплоть до Апшерона.

Течения в Каспии определяются ветровым полем, стоком рек (Волга и Урал) и распределением поля плотности воды. Они зависят от глубины, рельефа дна и конфигурации береговой линии моря. Сравнение скоростей стоковых, плотностных, ветровых и компенсационных течений показывает доминирующую роль ветровых течений в динамике вод Северного Каспия, поскольку повторяемость штиля в этом районе мала (6–8 %). Мелководность этой акватории обуславливает резкие изменения направления и скорости ветровых течений в связи с резкими изменениями ветровых условий. По материалам наблюдений, на плавмаяках и многосуточных станциях в Северном Каспии в среднем в 70 % проявляются ветровые течения, в 12 %

преобладают градиентные течения, вызванные сгонно-нагонными колебаниями уровня моря, около 18 % составляют слабые, неустойчивые течения. Скорость поверхностных течений на акватории моря изменяется от 10 до 50 см/с [Гидрометеорология..., 1992a; Kostianou, Kosarev, 2005].

В Северном Каспии, в основном, наблюдается ветровое волнение, так как зыбь (приходящая, как правило, с юго-востока) развивается здесь редко. При скорости ветра 5–10 м/с волны на мелководье могут достигать своих предельных размеров: высота — 5 м, период — 10 с, длина — 85 м. В районе свала глубин отмечаются волны высотой 2 м, южнее высота их увеличивается до 4 м и более. В западной части Северного Каспия (о. Тюлений) наибольшую повторяемость имеет волнение юго-восточного и восточного направления, в северо-восточной части (о. Зюйдвестовая Шалыга) — западного и восточного направления. В южных районах Северного Каспия преобладает восточное и северо-восточное волнение [Лебедев, Костяной, 2005].

Наиболее слабое волнение наблюдается в мае-июле, при этом нередко случаи полного штиля на всей акватории северной части моря. Средняя повторяемость волн высотой менее 0,5 м составляет 58,6 %; 0,5–1 м — 27,5 %; 1–2 м — 13 %; 2–3 м — 0,8 % и более 3 м — 0,1 %. Пространственное распределение волн в Среднем и Южном Каспии хорошо согласуется с районированием Каспия по преобладающему ветру. Так, при северных ветрах в районе Махачкала — Дербент в прибрежной зоне преобладают волны высотой 2–3 м, а вдали от берега — 4–6 м. В этом районе при восточных ветрах наблюдается зыбь высотой более 3 м. В районе Апшеронского архипелага область с максимальным волнением располагается к северо-западу от Нефтяных Камней. При сильных штормах (скорость ветра более 25 м/с) к северо-востоку от Апшеронского полуострова развиваются волны высотой 7,5–8 м, а в экстремальных штормовых условиях и до 9–10 м. В районе Форт-Шевченко наибольшая высота волн (более 4 м) наблюдаются при юго-восточных штормовых ветрах. У побережья юго-западной и юго-восточной части моря во время сильных ветров (10–15 м/с) преобладают волны высотой 2 м, при этом на отдельных прибрежных участках может наблюдаться только слабое волнение. При усилении ветра до 20 м/с высота волн возрастает до 3 м, а при сильном шторме (около 25 м/с) достигает 4 м и более. При этом в центральной части Южного Каспия высоты волн примерно на 2–3 м выше, чем у побережья. У туркменского побережья штормовые ветры (16–20 м/с) вызывают волнение до 3 м, а сильные штормы (21–25 м/с) — до 4 м [Лебедев, Костяной, 2005].

С территории России в Каспий впадают реки Волга, Терек, Сулак и Самур; последняя является пограничной рекой с Азербайджанской Республикой. Сток р. Волги, в среднем равный 270 км³ в год, составляет примерно 80 % поверхностного стока в море [Kostianou, Kosarev, 2005; Зонн и др., 2015б].

За время инструментальных наблюдений (с 1837 г.) амплитуда колебаний уровня Каспийского моря составила более 3 м. С зимы 1992/1993 гг. до лета 1995 г. наблюдался резкий рост уровня моря до отметки –26,4 м в балтийской системе высот со скоростью около 20 см/год. Затем до зимы 1997/1998 гг. наблюдалось очередное резкое понижение до отметки –27,1 м со скоростью 22 см/год. Умеренное падение продолжилось до зимы 2001/2002 гг. до отметки –27,4 м со скоростью 6 см/год. Последующий умеренный рост до отметки –26,7 м со скоростью 10 см/год наблюдался до лета 2005 г. С лета 2005 г. по зиму 2009/2010 гг. уровень моря умеренно падал

до отметки $-27,3$ м со скоростью $-8,5$ см/год. Это падение продолжилось и в 2010 г. В 2010–2012 гг. скорость падения уровня Каспия увеличилась до 15 см/год; к марту 2013 г. уровень моря составил $-27,6$ м [Лебедев, Костяной, 2005; Kouraev et al., 2011; Kostianoy et al., 2014; Lebedev, Kostianoy, 2008]. Падение уровня Каспия продолжилось и в последующие годы, что отчётливо видно по спутниковым данным до конца 2015 г., когда уровень моря в июне достиг отметки $-27,74$ м, а уже в декабре $-28,2$ м. Поскольку в июне 2016 г. уровень моря находился на уровне $-27,72$ м, примерно на той же отметке, что и в июне 2015 г., то пока трудно говорить о стабилизации уровня Каспия.

Хозяйственное и геополитическое значение Каспийского моря огромно. Море омывает берега пяти государств: России, Казахстана, Туркменистана, Ирана, Азербайджана. Для России море имеет важное транспортное и рыбопромысловое значение. Кроме того, на акватории и в прибрежной зоне российского сектора Каспия расположено большое количество объектов нефтегазовой отрасли, ведется добыча нефти в море [Зонн и др., 20156].

В Каспийском море развито судоходство. На Каспийском море действуют паромные переправы, в частности, Баку-Туркменбаши, Баку-Актау, Махачкала-Актау. Каспийское море имеет судоходную связь с Азовским морем через реки Волгу, Дон и Волго-Донской канал. Главный порт РФ на Каспии — Астрахань [Зонн и др., 20156].

На Каспии ведётся промышленное рыболовство (осетровые, лещ, сазан, судак, килька), а также производство икры. В Каспийском море осуществляется более 90 % мирового вылова осетровых.

Природная среда Каспийского побережья с песчаными пляжами, минеральными водами и лечебными грязями в прибрежной зоне создаёт хорошие условия для отдыха и лечения. В то же время по степени развитости курортов и туристской индустрии Каспийское побережье России заметно проигрывает другим регионам из-за отсутствия безопасности [Зонн и др., 20156].

В Каспийском море разрабатывается множество месторождений нефти и газа. Доказанные ресурсы нефти в Каспийском море составляют около 10 млрд т. Нефтедобыча в Каспийском море началась в 1820 г., когда на Апшеронском шельфе близ Баку была пробурена первая нефтяная скважина. Во второй половине XIX века началась добыча нефти в промышленных объёмах на Апшеронском полуострове, затем и на других территориях. В 1949 г. на Нефтяных Камнях впервые начали добывать нефть со дна Каспийского моря. Помимо добычи нефти и газа, на побережье Каспийского моря и шельфе ведётся добыча соли, известняка, камня, песка и глины [Зонн и др., 20156].

Наиболее существенными источниками загрязнения поверхности Каспийского моря являются разведка и эксплуатация нефтяных месторождений, а также естественные выходы нефти на морскую поверхность по трещинам на дне моря. Существует мнение [Алиев, 2003], что ежегодно из различных источников в Каспий поступает свыше миллиона тонн нефти.

Давно известны поверхностные проявления грязевого вулканизма в Каспийском море, или так называемые естественные грифоны. Наибольшее количество подводных вулканов (более 300), притом крупных, сконцентрировано на северо-западном борту Южно-Каспийской впадины. Этот участок акватории Каспия является

уникальным и классическим регионом развития грязевого вулканизма. По количеству вулканов, их разнообразию и интенсивности проявления он не имеет аналогов в мире.

Большинство грязевых вулканов Южно-Каспийской впадины находится в грифоновой стадии развития, выделяя илистую грязь, воду, газ и нефть. Активизация подводных вулканов и грифонов в местах разгрузки углеводородов приводит к появлению на воде грязевых и нефтяных пятен. Грязевулканические проявления служат прямыми показателями нефтегазоносности недр, поэтому механизм образования грязевых вулканов и периодичность их извержения привлекают внимание исследователей [Лебедев, Кулакова, 1981]. Вызывает интерес вопрос о влиянии сейсмичности на извержения и вообще активизацию деятельности морских грязевых вулканов. Установлено немало фактов, когда извержения грязевых вулканов обуславливаются землетрясениями, эпицентры которых находятся на разных расстояниях от вулканов, и сейсмические волны передаются с некоторым опозданием, способствуя пробуждению вулкана не в тот же день, а через несколько дней и даже недель в зависимости от дальности расстояния между вулканом и эпицентром землетрясения, магнитуды последнего и глубины его очага [Алиев, 2006]. В генетическом отношении оба эти природные явления связаны своими проявлениями с накапливающимся в земной коре тектоническим напряжением, которое и обуславливает их взаимодействие.

5.2. НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЙОНЕ НЕФТЕДОБЫЧИ НЕФТЯНЫЕ КАМНИ

Картина поверхностных загрязнений Каспийского моря нефтесодержащими пленками, выявленная нами в ходе спутникового мониторинга, существенным образом отличается от ситуаций, сложившихся в Чёрном и Балтийском морях, и во многом predetermined природными особенностями Каспийского моря, главной из которых является наличие больших запасов нефти и газа в его недрах.

Каспий относится к крупнейшим нефтяным провинциям мира, и именно в этом регионе был создан один из первых в мире морских промыслов. Сейчас со дна Каспийского моря осуществляется основная часть всей добычи нефти и газа в Азербайджане. Одним из морских месторождений является месторождение Нефтяные Камни, расположенное в акватории Каспийского моря, в 100 км восточнее Баку. Разработка этого месторождения началась в 1949 г. В то время Нефтяные Камни являлись крупнейшим в мире морским нефтяным месторождением, и для добычи нефти решено было построить платформы. Для того чтобы создать основания буровых платформ, было затоплено семь списанных кораблей, в том числе и первый в мире самоходный металлический нефтеналивной танкер, построенный в 1877–78 гг. по заказу «Товарищества братьев Нобель» для доставки керосина наливом из Баку в Царицын (ныне Волгоград) и Астрахань. Сейчас Нефтяные Камни — это более двухсот стационарных платформ, связанных между собой эстакадами общей протяжённостью 350 км.

На спутниковых радиолокационных изображениях (РЛИ), а также на «безоблачных» изображениях сенсоров оптического диапазона, полученных над районом нефтедобычи Нефтяные Камни, идентифицируются обширные нефтяные загрязнения

морской поверхности, причём следы нефти выявляются иногда на площади более 800 км² вокруг морских буровых платформ.

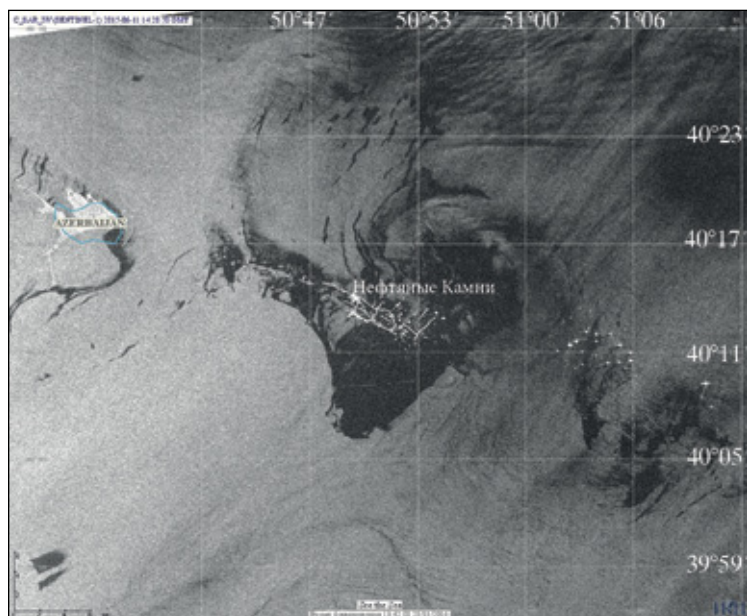
Характерные примеры проявления нефтяного загрязнения морской поверхности вокруг района нефтедобычи на изображениях, полученных при помощи SAR-С ИСЗ Sentinel-1A и при помощи многоспектрального спектрорадиометра оптического диапазона OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8, приведены на рис. 5.2. На РЛИ от 11 июня 2015 г. нефтяное загрязнение, имеющее площадь 290 км², визуализируется как тёмная область пониженного рассеяния (см. рис. 5.2a). На цветосинтезированном изображении оптического диапазона, полученном 19 августа 2015 г. в области солнечного блика, нефтесодержащие плёнки имеют повышенную яркость и проявляются как светлые структуры, окружённые тёмным ореолом, площадь нефтяного загрязнения в данном случае составляет около 330 км² (см. рис. 5.2б). На обоих изображениях отчётливо видны нефтедобывающие платформы, соединённые эстакадами.

Следует отметить, что непрерывное загрязнение морской поверхности нефтью в районе Нефтяных Камней обусловлено в основном не утечками в процессе нефтедобычи или устаревшим оборудованием, а поступлением нефти из естественных и искусственных грифонов (выход нефти на поверхность моря). Естественные выходы нефти на поверхность моря в этом районе были известны задолго до начала нефтедобычи. Нефть просачивалась по трещинам из выступающей над поверхностью моря каменной гряды Чёрные камни, которая позже получила новое название — Нефтяные Камни. Образование же искусственных грифонов является характерной особенностью процесса морской разведки и нефтедобычи. Согласно опубликованным данным, количество нефти, поступающей на морскую поверхность в районе промыслов Нефтяные Камни, может колебаться от 100 до 500 т в сутки [Маилян, 1966; Brandon, 1995].

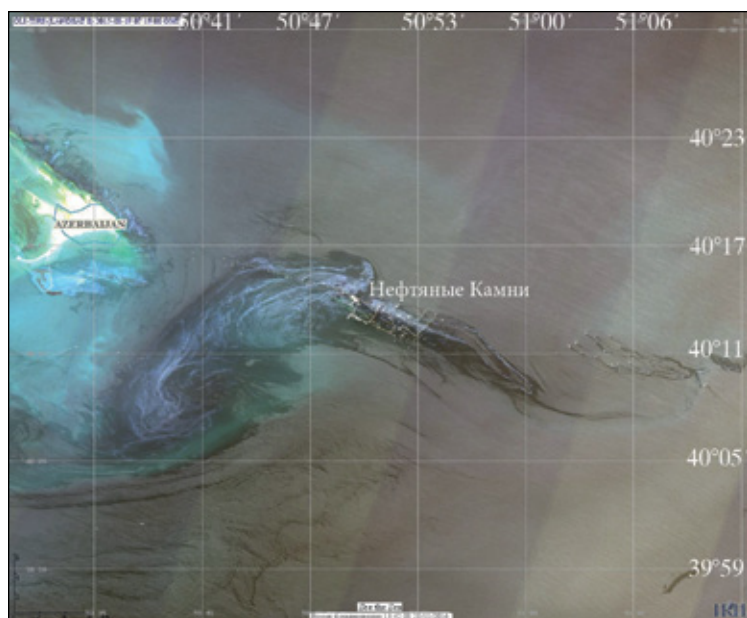
Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) являются основным средством спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени её загрязнённости. Для повышения степени надёжности извлечения необходимой информации из данных спутниковой радиолокации представляется необходимым установить зависимость радиолокационных образов нефтяного загрязнения от ветроволновой ситуации в районе интереса на момент проведения съёмки.

По результатам анализа большого массива РЛИ, полученных над районом нефтедобычи Нефтяные Камни сенсором ASAR ИСЗ Envisat в 2009–2011 гг. и сенсором SAR-С ИСЗ Sentinel-1A, -1B в течение 2014–2016 гг., нами было выявлено, что нефтяные загрязнения морской поверхности уверенно детектируются на всех РЛИ, полученных в условиях умеренных ветров (3–8 м/с).

Нефтяная плёнка, покрывающая морскую поверхность и образующая сликовую область, проявляется на РЛИ в виде обширных темных областей пониженного рассеяния на фоне относительно светлой взволнованной морской поверхности. Ослабление интенсивности обратно-рассеянного радиолокационного сигнала в сликовой области достигает 2–11 дБ, что определяется толщиной поверхностной плёнки, скоростью приповерхностного ветра, а также поляризацией зондирующего сигнала. Типичные примеры проявления нефтяного загрязнения морской поверхности в районе нефтедобычи Нефтяные Камни на спутниковых РЛИ, полученных при умеренном приповерхностном ветре, представлены на рис. 5.3. На врезках приводятся графики вариации интенсивности обратно-рассеянного радиолокационного сигнала вдоль линий разреза АБ.

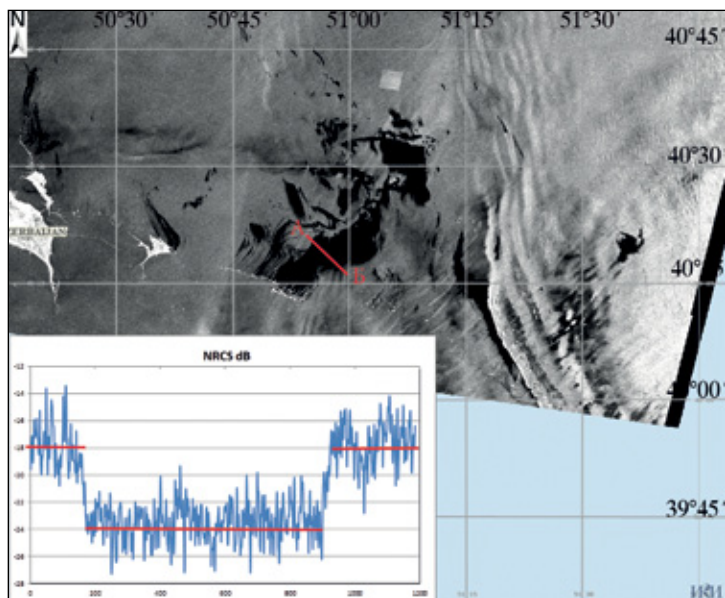


a

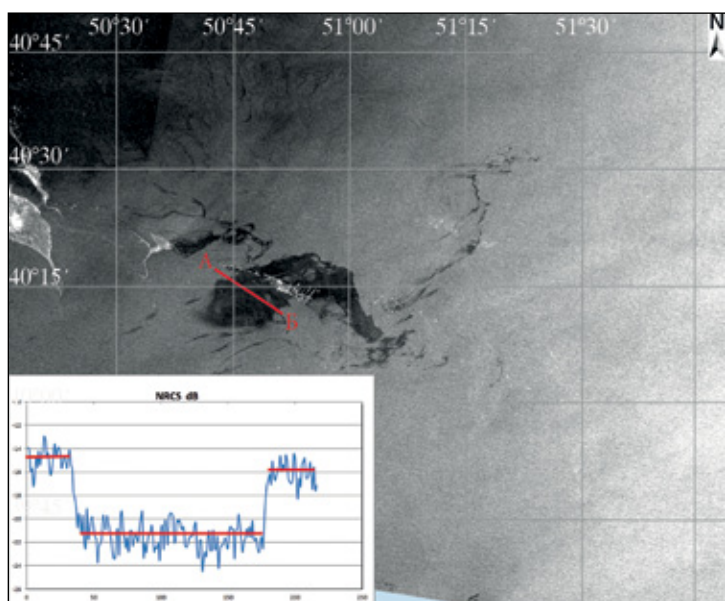


б

Рис. 5.2. Примеры проявления нефтяного загрязнения морской поверхности вокруг района нефтедобычи Нефтяные Камни на спутниковых изображениях: *a* — фрагмент РЛИ Sentinel-1A SAR от 11 июня 2015 г., 14:28 UTC; *б* — фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8 (R — 640–670 нм, G — 530–590 нм, B — 450–510 нм) от 19 августа 2015 г., 07:19 UTC



a



б

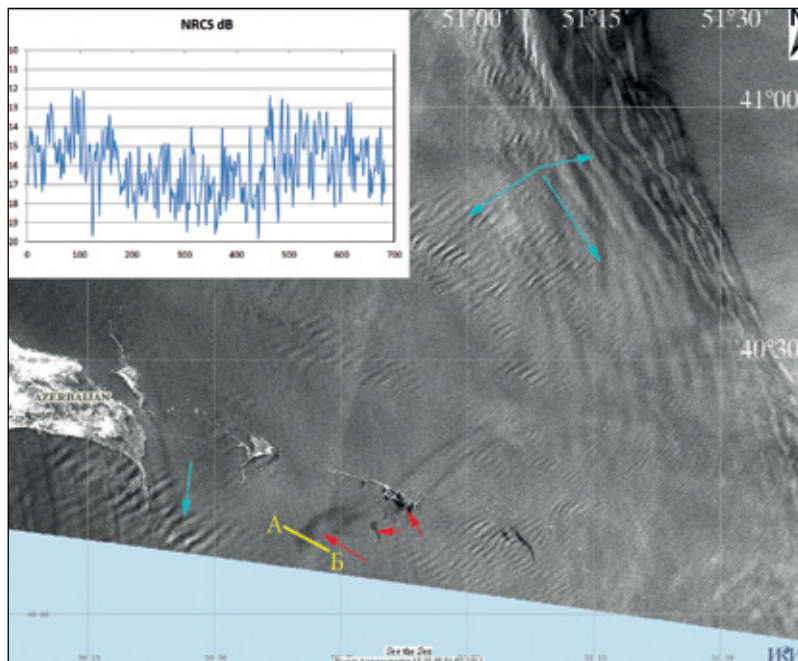
Рис. 5.3. Проявления нефтяного загрязнения морской поверхности в районе нефтедобычи Нефтяные Камни на спутниковых РЛИ, полученных при умеренном приповерхностном ветре: *a* — фрагмент РЛИ Sentinel-1A SAR от 29 мая 2015 г., 02:43 UTC, полученного на ВВ-поляризации. Совокупная площадь нефтяного загрязнения 375 км²; *б* — фрагмент РЛИ Envisat ASAR от 7 мая 2010 г., 06:45 UTC, полученного на ГГ-поляризации. Совокупная площадь нефтяного загрязнения 290 км²

Можно утверждать, что усложнение гидрометеорологических условий — усиление приводного ветра, развитие волнения, выпадение интенсивных осадков, прохождение резких атмосферных и ветровых фронтов, развитие конвективных процессов или распространение внутренних гравитационных волн в приводном слое атмосферы — всё это затрудняет распознавание нефтяного загрязнения на морской поверхности. Одним из факторов, негативно влияющих на уверенное детектирование нефтяного загрязнения на спутниковых радиолокационных изображениях, являются активные атмосферные процессы, протекающие в этом регионе и приводящие к весьма значительным вариациям поля приповерхностного ветра. Безусловно, атмосфера прозрачна для РЛ-сигнала и явления, происходящие в ней, отражаются на РЛИ только как неоднородности в поле мелкомасштабного волнения морской поверхности. Пространственные вариации мелкомасштабной компоненты поверхностного волнения, связанные с аэродинамическими возмущениями, проявляются в РЛИ в виде пространственных неоднородностей в распределении интенсивности рассеянного сигнала.

На рис. 5.4 приведён пример РЛИ, полученного над районом нефтедобычи Нефтяные Камни при скорости приповерхностного ветра 10–11 м/с и в присутствии конвективных процессов, развивающихся в приводном слое атмосферы.



Рис. 5.4. Фрагмент РЛИ Sentinel-1A SAR от 18 марта 2015 г., 02:43 UTC, полученного над районом нефтедобычи Нефтяные Камни. Относительно небольшое нефтяное загрязнение морской поверхности площадью около 4 км^2 , идентифицируется в непосредственной близости от нефтедобывающей платформы



Р и с. 5.5. Фрагмент РЛИ Sentinel-1A SAR от 22 июня 2015 г., 02:43 UTC, полученного над районом нефтедобычи Нефтяные Камни. Квазипериодические колебания интенсивности обратно-рассеянного сигнала, отмеченные голубыми стрелочками, обусловлены внутренними гравитационными волнами, распространяющимися в приводном слое атмосферы. Области РЛИ, где пониженное рассеяние обусловлено присутствием нефтяной плёнки на морской поверхности, отмечены красными стрелочками. Площадь загрязнения, восстановленная по данным спутниковой радиолокации, составляет около 70 км²

Сильный приповерхностный ветер (более 9–10 м/с) в сочетании с развитым поверхностным волнением препятствует развитию обширного slicka, так как при больших скоростях ветра поверхностные плёнки, как нефтяные, так и биогенные, начинают разрушаться под воздействием ветра и волнения и не всегда могут быть идентифицированы на спутниковых РЛИ. Вариации поля приповерхностного ветра, обусловленные конвективными движениями в приводном слое атмосферы, приводят к появлению на РЛИ ячеистых структур. В результате совокупного влияния описанных выше факторов нефтяное загрязнение слабо проявляется на спутниковом РЛИ — различим только очень небольшой участок пониженного рассеяния в непосредственной близости от платформы.

На момент получения РЛИ, представленного на рис. 5.5, в приводном слое атмосферы над районом интереса распространялось множество пакетов внутренних гравитационных волн. На РЛИ эти волны проявляются в силу того, что связанные с ними вариации скорости и направления ветра модулируют шероховатость морской поверхности, а это, в свою очередь, проявляется в модуляции сечения обратного рассеяния. Вызванные прохождением пакетов внутренних волн вариации поля приповерхностного ветра проявляются на радиолокационном изображении как зоны

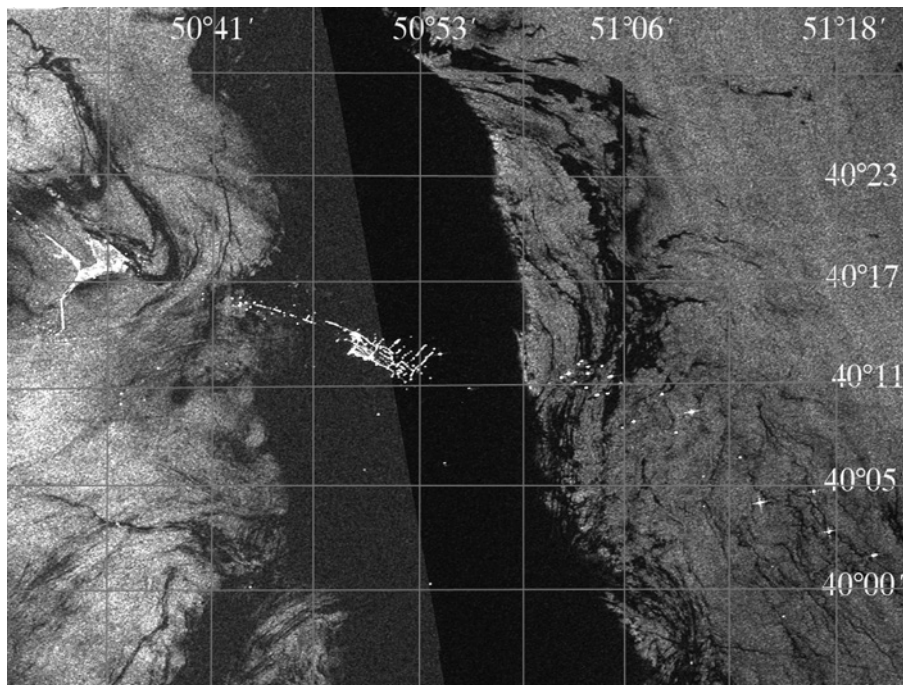
квазипериодического усиления и ослабления обратно рассеянного сигнала, и вариации обратно-рассеянного сигнала, обусловленные прохождением внутренних волн достаточно велики. Вариации интенсивности обратно-рассеянного сигнала, связанные с присутствием нефтяной плёнки на морской поверхности в этом случае невелики и составляют примерно 1,5 дБ (см. график на врезке).

На основе анализа большого количества спутниковых данных мы установили, что площади нефтяных загрязнений, идентифицируемых на спутниковых РЛИ, полученных при высоких скоростях приповерхностного ветра и в присутствии активных процессов, развивающихся в приводном слое атмосферы, существенно меньше, чем площади загрязнений, выявленных при умеренных ветрах и спокойной атмосфере. Таким образом, площадь нефтяного загрязнения, определяемая исключительно по радиолокационным данным может оказаться заниженной, если данные получены в присутствии значительных возмущений в приводном слое атмосферы.

Существенно иная ситуация наблюдается при слабом приповерхностном ветре. На РЛИ, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра, как правило, выявляются обширные тёмные области пониженного рассеяния. При слабом ветре или его отсутствии гравитационно-капиллярная компонента поля поверхностного волнения, ответственная за брегговское резонансное рассеяние, может не успеть развиться, что приводит к значительному ослаблению интенсивности обратно-рассеянного сигнала. Кроме того, на РЛИ, полученных в условиях слабого приповерхностного ветра, обычно присутствует много областей пониженного рассеяния, не связанных с наличием на морской поверхности нефтяной плёнки, что значительно повышает вероятность «ложной тревоги» при мониторинге нефтяных загрязнений, а также приводит к завышению их площади [Mityagina, Lavrova, 2015a, 2016].

Рисунок 5.6 содержит фрагмент РЛИ, полученного над районом нефтедобычи Нефтяные Камни в близких к штилевым условиям приповерхностного ветра. Большую часть снимка занимает тёмная область пониженного рассеяния. К западу и востоку от области пониженного рассеяния, обусловленной близкими к штилевым условиям приповерхностного ветра, видны более светлые области, где ветер усиливается до умеренного, благодаря чему в этих областях повышается интенсивность обратного рассеяния. Множество вихревых структур визуализируется на изображении посредством биогенных плёнок, присутствующих на поверхности. Эти биогенные плёнки — результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом, фито- и зоопланктона, а также бактерий. Они образуются в море при сложных биохимических реакциях в процессе жизнедеятельности и разложения морских организмов, и не могут считаться загрязнениями в прямом смысле слова. Подобные биогенные плёнки чувствительны к взаимодействию с поверхностными течениями и принимают геометрическую форму, отвечающую локальной структуре циркуляции вод. Выявить на этом РЛИ нефтяное загрязнение вокруг платформ, а тем более, установить его площадь, не представляется возможным.

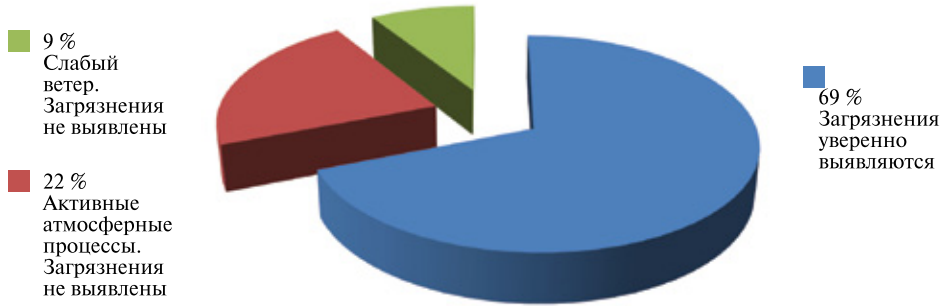
Подобные неоднозначности в интерпретации радиолокационных данных и выявлении нефтяного загрязнения морской поверхности могут быть разрешены на основе комбинированного использования данных спутниковой радиолокации и данных, полученных в видимой и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра (если имеется квазисинхронное изображение оптического диапазона). Примеры такого совместного анализа данных представлены в п. 2.2.5 настоящей монографии.



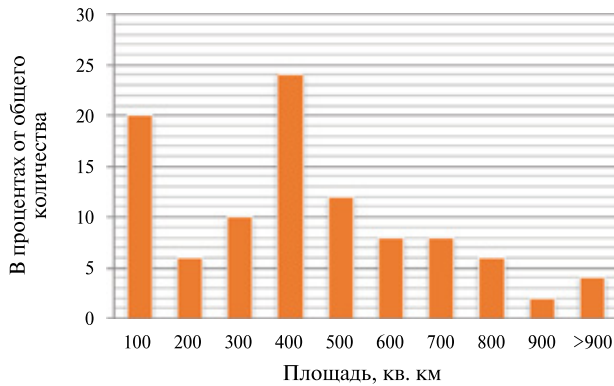
Р и с. 5.6. Фрагмент РЛИ ASAR Envisat от 4 июня 2015 г., 02:43 UTC, полученного над районом нефтедобычи Нефтяные Камни в условиях слабого приповерхностного ветра. Ровная линия между серой и чёрной зонами — результат сшивки двух полос снимка

Мы провели ретроспективный анализ всех радиолокационных изображений акватории Каспийского моря над районом Нефтяных Камней, полученных сенсорами SAR ERS-2 и ASAR Envisat в течение 2010–2011 гг. (113 изображений), а также сенсором SAR-C Sentinel-1A, -1B за двухлетний период с октября 2014 по октябрь 2016 г. (140 изображений). Оказалось, что нефтяное загрязнение с уверенностью выявляется в 69 % случаев. В 22 % случаев нефтяные загрязнения не выявляются, потому что их проявления маскировались радиолокационными образами активных атмосферных процессов либо потому, что съёмки проводились в условиях сильного приповерхностного ветра. 9 % случаев приходится на ситуации, когда на момент съёмки в районе интереса наблюдался слабый приповерхностный ветер или условия, близкие к штилевым, на РЛИ присутствует обширная область пониженного рассеяния и уверенно выделить нефтяное загрязнение не удаётся. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 5.7.

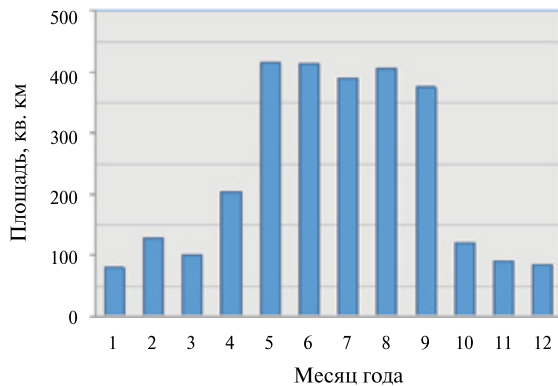
Диаграмма, отражающая распределение площадей индивидуальных нефтяных загрязнений морской поверхности в районе нефтедобычи Нефтяные Камни, выявленных на спутниковых РЛИ, представлена на рис. 5.8. Из диаграммы следует, что наиболее часто наблюдается загрязнение площадью порядка 400 км^2 , однако в отдельных случаях их площади могут превышать 900 км^2 . Следует отметить также, что представленные оценки базируются исключительно на спутниковых данных и могут в ту или другую сторону отличаться от измерений, проведённых *in-situ*.



Р и с. 5.7. Частота выявления нефтяного загрязнения морской поверхности Каспийского моря в районе нефтедобычи Нефтяные Камни на спутниковых РЛИ в зависимости от приповерхностного ветра



Р и с. 5.8. Изменчивость индивидуальных размеров нефтяных загрязнений морской поверхности, выявленных на спутниковых РЛИ в районе нефтедобычи Нефтяные Камни



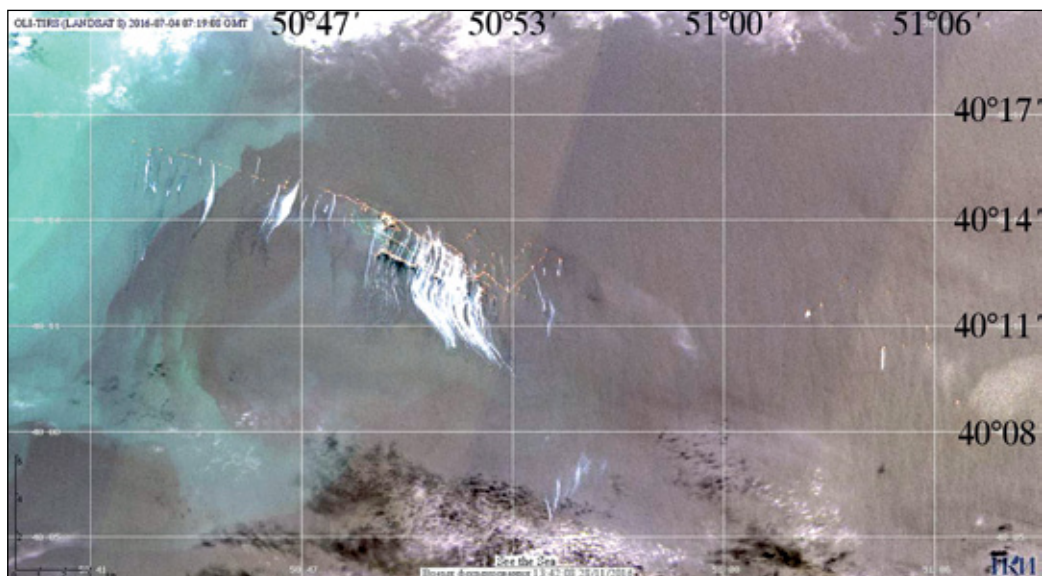
Р и с. 5.9. Изменчивость усреднённых за месяц индивидуальных площадей нефтяных загрязнений морской поверхности, выявленных на спутниковых РЛИ в районе нефтедобычи Нефтяные Камни

Были рассчитаны также средние площади индивидуальных нефтяных загрязнений морской поверхности в районе нефтедобычи за каждый месяц. Диаграмма, отражающая соответствующее распределение, представлена на рис. 5.9. Из диаграммы следует, что площади загрязнений, выявляемые на РЛИ, полученных в холодный период — с октября по апрель — относительно невелики. Этот факт может быть объяснён тем, что в этот период в районе интереса интенсифицируются атмосферные процессы и нередко наблюдаются сильные ветры и шторма.

Задачи выявления загрязнения морской среды и исследования динамических процессов, происходящих в этой среде, необходимо решать в тесной взаимосвязи, поскольку, попадая в морскую среду, загрязнения становятся частью этой среды и развиваются вместе с ней под воздействием метеорологических и гидрологических факторов. Факторами, оказывающими наибольшее влияние на размер, форму и направление распространения нефтяного загрязнения в окрестности нефтедобывающей платформы являются приповерхностный ветер и поверхностные течения. Район Апшеронского полуострова — это самый бурный район на всей акватории Каспийского моря. Здесь орографические и мысовые эффекты создают благоприятные условия для развития ветра, наблюдаются частые штормовые ветры. Система поверхностных течений в районе нефтедобычи Нефтяные Камни является сложной и отличается неустойчивостью. В этом районе наблюдаются высокие скорости поверхностных течений, между о. Жилой и Нефтяными Камнями, например, скорость поверхностных течений иногда достигает 100 см/с и более [Мамедов, 2007]. Несомненный интерес предоставляет возможность выявления относительного вклада приповерхностного ветра и поверхностных течений в распространение загрязнений.

На основе анализа спутниковых изображений было установлено, что поверхностные течения оказывают на процесс распространения поверхностного нефтяного загрязнения существенно большее влияние, чем приповерхностный ветер. Как правило, на первом этапе своей эволюции после всплытия на поверхность нефтяное загрязнение растекается и распространяется в основном под действием приповерхностного ветра. Типичный пример подобной ситуации приведён на рис. 5.10. Здесь представлен фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным сенсора OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8, отображающий участок акватории Каспийского моря в районе нефтедобычи Нефтяные Камни. Изображение получено в зоне солнечного блика, нефтяные плёнки имеют повышенную яркость и проявляются как яркие светлые структуры. На изображении отчётливо видно, что после выхода на поверхность нефтяное загрязнение распространяется под влиянием преобладающего на момент наблюдения в районе интереса северного ветра. Стики вытягиваются по ветру к югу от платформы на расстояние около 5 км. Общая площадь загрязнения составляет около 20 км². Такая ситуация достаточно часто наблюдается на спутниковых изображениях этого района, площадь загрязнения в таких случаях относительно невелика для этого района.

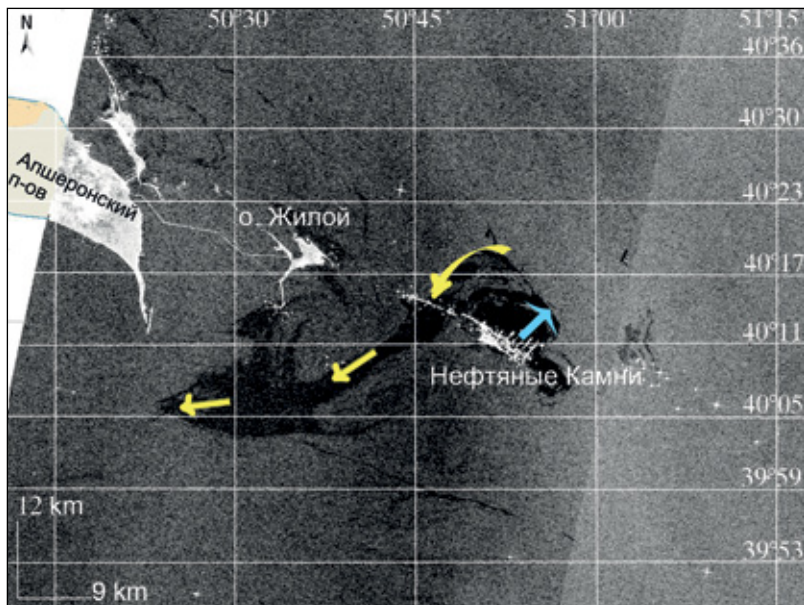
Однако траектория дрейфа и картина растекания нефтяного загрязнения становятся гораздо более сложными, если по мере своего распространения оно вовлекается в вихревые движения, обусловленные присутствием в районе интереса вихревых диполей и вихрей разных знаков. На спутниковых изображениях часто можно наблюдать процесс распространения нефтяного загрязнения, включающий в себя два этапа.



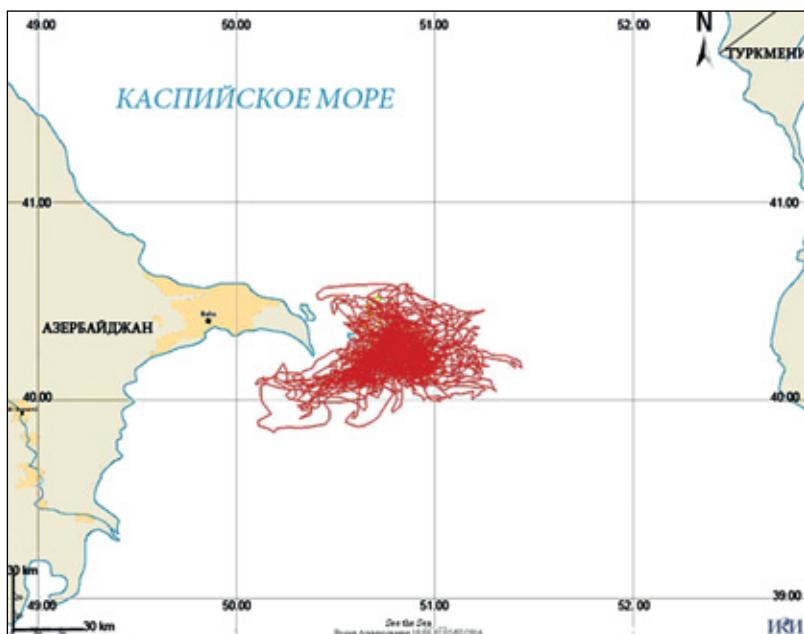
Р и с. 5.10. Пример эволюции нефтяного загрязнения морской поверхности в районе нефтедобычи Нефтяные Камни под влиянием ветра. Фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным сенсора OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8 (R — 640–670 нм, G — 530–590 нм, B — 450–510 нм) от 4 июля 2016 г., 07:19 UTC

На первом этапе нефтяные плёнки перемещаются и растекаются под действием локального ветра до тех пор, пока не оказываются захваченными поверхностными течениями. На втором этапе своего распространения нефтяное загрязнение может оказаться захваченным поверхностными течениями, и распространяться этими течениями на достаточно большие расстояния или же оказаться вовлечённым в вихревые движения. Нефтяное загрязнение, захваченное поверхностными течениями, может распространяться на значительные расстояния, вплоть до 70 км, в направлениях, не совпадающих с направлением приповерхностного ветра. Фрагмент РЛИ, отображающий такой двухэтапный процесс распространения нефтяного загрязнения вблизи района нефтедобычи Нефтяные Камни, приведён на рис. 5.11. На момент проведения РЛ-съёмки в районе интереса наблюдался умеренный юго-западный ветер. На первом этапе после всплытия на поверхность нефтяное загрязнение распространялось в северо-восточном направлении (голубая стрелочка на рисунке). На расстоянии 6,5 км от выхода на поверхность нефтяное загрязнение оказалось захваченным поверхностным течением, обусловленным развивающимся вихревым диполем, повернуло на северо-запад, а затем, увлечённое сопутствующим вихревому диполу течением, продолжило распространяться на юго-запад, т. е. против ветра, на расстояние до 40 км от начальной точки. Вторая стадия распространения загрязнения отмечена жёлтыми стрелочками. Общая площадь загрязнения составляет около 325 км².

Карта, представленная на рис. 5.12, содержит схематические представления нефтяных загрязнений в окрестностях района нефтедобычи Нефтяные Камни, выявленных на радиолокационных изображениях за 2010–2011 гг. [Митягина и др., 2015].



Р и с. 5.11. Пример эволюции нефтяного загрязнения морской поверхности в районе нефтедобычи Нефтяные Камни под влиянием ветра и течений. Фрагмент РЛИ, полученного сенсором Envisat ASAR 24 июня 2010 г. в 06:36 UTC. Площадь нефтяного загрязнения — 325 км²



Р и с. 5.12. Сводная карта нефтяных загрязнений в окрестности района нефтедобычи Нефтяные Камни, выявленных по спутниковым радиолокационным данным за 2010–2011 гг.

Можно видеть, что площадь акватории Каспийского моря вблизи платформы с той или иной частотой подвергающаяся нефтяному загрязнению, составляет более 6200 км², что является серьёзным фактором, приводящим к ряду негативных экологических последствий и ухудшающим экологическую ситуацию в Каспийском море.

5.3. ЗАГРЯЗНЕНИЕ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЮЖНОГО КАСПИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ ГРЯЗЕВЫМ ВУЛКАНИЗМОМ НА МОРСКОМ ДНЕ

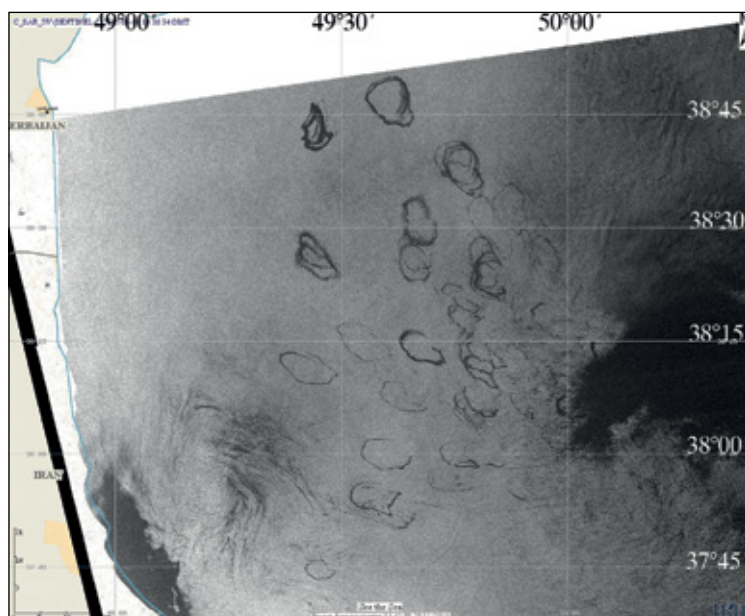
Западный борт Южно-Каспийской впадины является уникальным и классическим регионом развития грязевого вулканизма. По количеству вулканов, их разнообразию и интенсивности проявления он не имеет аналогов в мире. На северо-западном борту Южно-Каспийской впадины сконцентрировано большое количество подводных вулканов, притом крупных.

Большинство грязевых вулканов Южно-Каспийской впадины характеризуются интенсивной грифноно-сальзовой деятельностью, т.е. периодически выделяют относительно небольшие объёмы газов, грязи и воды с частицами нефти, что приводит к появлению на воде грязевых и нефтяных пятен. Грязевулканические проявления служат прямыми показателями нефтегазоносности недр, поэтому механизм образования грязевых вулканов и периодичность их извержения привлекают внимание исследователей. Существует множество публикаций, посвящённых разносторонним исследованиям этого явления [Алиев, 2006; Гаджиев, Багирова, 2010; Лебедев, Кулакова, 1981], анализ их проявлений на радиолокационных снимках приводится, в частности, в работах [Иванов и др., 2007; Лаврова и др. 2011a; Mityagina, Lavrova, 2015b, 2016].

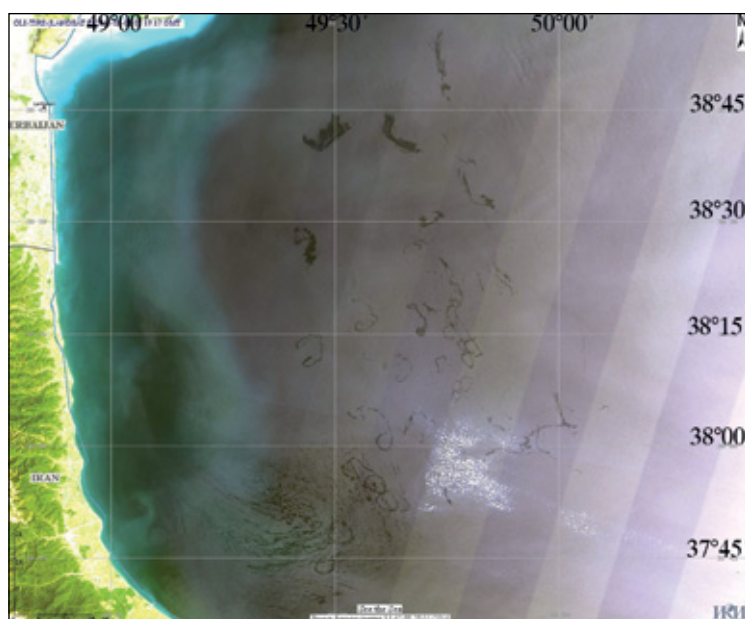
Характерные примеры проявления плёночных загрязнений юго-западной части Каспийского моря на изображениях, полученных при помощи SAR-C ИСЗ Sentinel-1A и при помощи многоспектрального спектрорадиометра оптического диапазона OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8, приведены на рис. 5.13. Плёнки проявляются на морской поверхности в виде хорошо узнаваемых многочисленных окружностей, серповидных, подковообразных и спиралеобразных структур относительно небольших размеров. Подобные плёночные загрязнения регулярно выявляются на спутниковых изображениях этого района и концентрируются на поверхности моря примерно в одних и тех же местах.

Карта, изображённая на рис. 5.14, содержит схематическое представление пространственной локализации плёночных загрязнений, того же типа, что и представленное на рис. 5.13, выявленных нами на спутниковых изображениях юго-западной части Каспийского моря за 2010–2011 гг. [Митягина и др., 2015].

Сопоставление сводной карты поверхностных загрязнений и карты расположения грязевых вулканов Южно-Каспийского бассейна, представленной на рис. 5.15, показали, что географическое распределение плёночных поверхностных загрязнений совпадает с географическим распределением мест локализации подводных грязевых вулканов. Результаты сопоставления подтвердили, таким образом, наше предположение, что описанные выше загрязнения морской поверхности обусловлены грязевым вулканизмом и служат признаком наличия потока флюидов (нефти, газов, пластовых вод) с морского дна на поверхность в этом районе.



a



б

Р и с. 5.13. Примеры проявления плёночных загрязнений морской поверхности на спутниковых изображениях юго-западной части Каспийского моря: *a* — фрагмент РЛИ Sentinel-1A SAR от 4 июня 2015 г., 14:36 UTC; *б* — фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным OLI-TIRS ИСЗ Landsat-8 (R — 640–670 нм, G — 530–590 нм, В — 450–510 нм) от 3 августа 2015 г., 07:19 UTC

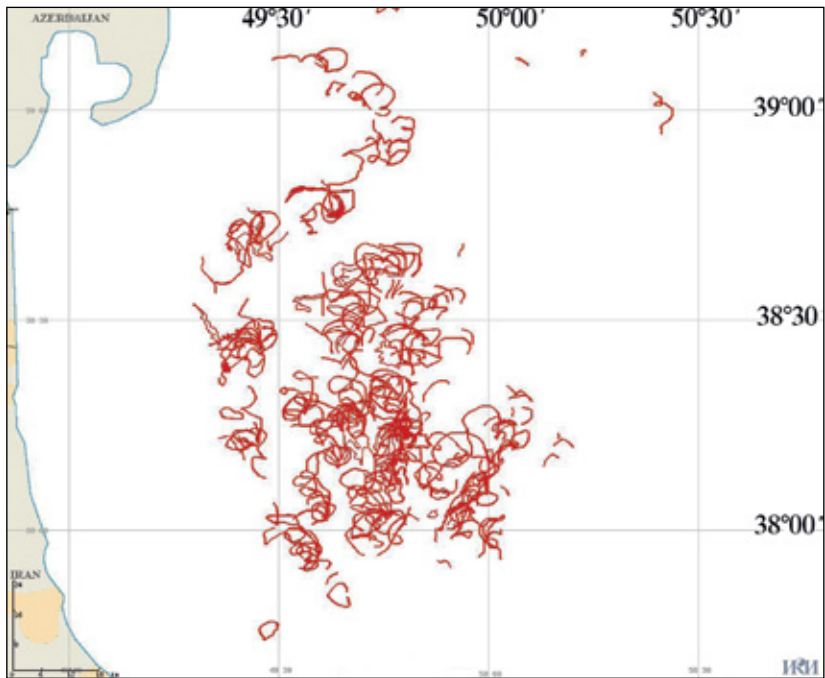


Рис. 5.14. Сводная карта поверхностных загрязнений морской поверхности юго-западной части Каспийского моря, составленная на основе спутниковых данных за 2010–2011 гг.



Рис. 5.15. Карта расположения грязевых вулканов Южно-Каспийского бассейна согласно [Алиев, Рахманов, 2008]. Красным эллипсом отмечено расположение поверхностных загрязнений морской поверхности, приведённых на рис. 5.14

Площадь отдельного загрязнения варьирует, как правило, в пределах 0,5–4 км², однако площади пятен, образовавшихся в результате значительной энергетической разгрузки, могут достигать 20 км².

Суммарные площади загрязнений, обусловленных грязевулканической активностью, идентифицируемых на одном спутниковом изображении, варьируют от нескольких десятков до полутора сотен квадратных километров.

Представляет интерес вопрос о связи грязевого вулканизма с сейсмичностью. Обладая большим объёмом исходных спутниковых данных, мы проанализировали все радиолокационные изображения акватории Каспийского моря в районе Южно-Каспийской впадины, полученные за период январь 2009 г. – апрель 2012 г. и содержащие поверхностные проявления грязевого вулканизма. Была рассмотрена зависимость частоты возникновения поверхностных проявлений грязевого вулканизма в радиолокационных данных от количества и магнитуд землетрясений в Южном Каспии и прилегающих к нему районах. Информация о землетрясениях с магнитудой более 4 баллов была получена из национального центра информации землетрясений USGS National Earthquake Information Center (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/>). Информация о менее сильных землетрясениях (3–4 балла) бралась из средств массовой информации (<http://news.day.az/tag/ex3138-zemletryaseniya/4/>).

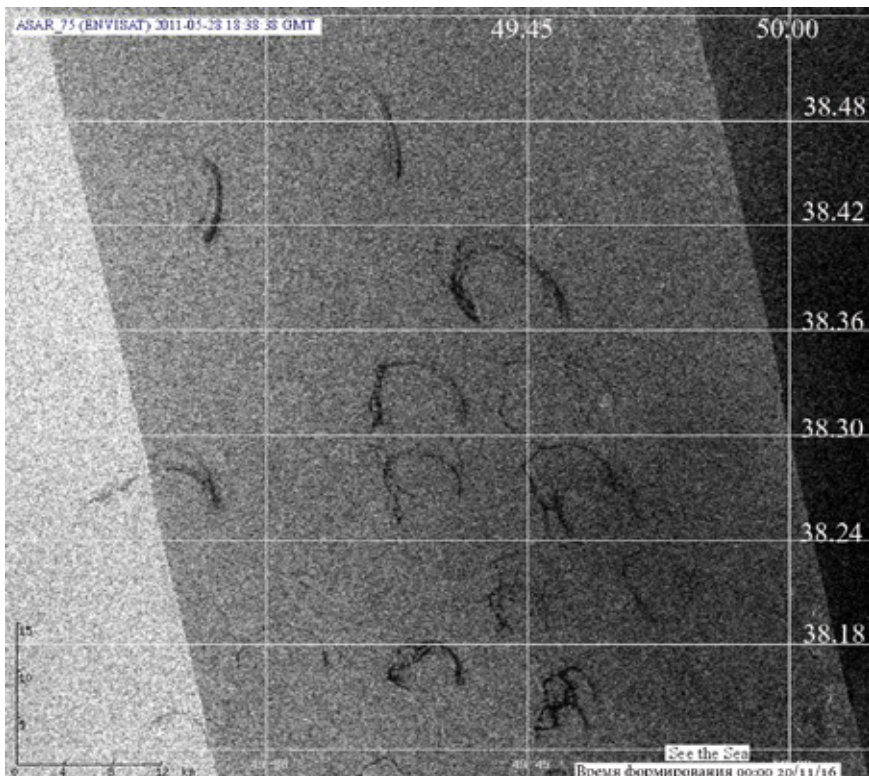


Рис. 5.16. Грязевулканические проявления в Южном Каспии на спутниковом РЛИ ASAR Envisat от 28 мая 2011 г., 06:59 UTC

Удалось выявить достаточно высокую корреляцию между проявлениями грифонов на спутниковых изображениях и землетрясениями магнитудой 3–4 балла. Так, например, по сообщению Азербайджанского Республиканского центра сейсмологической службы, 27 мая 2011 г. в 04:55 UTC на дне Каспия в 166 километрах от Баку было зарегистрировано землетрясение, магнитуда подземных толчков которого составила 3,90. На следующий день, 28 мая 2011 г., поверхностные признаки грязевулканических проявлений были зафиксированы на спутниковом РЛИ (рис. 5.16). Следует отметить, что на спутниковых изображениях, полученных в предыдущие дни, поверхностные проявления грязевого вулканизма в этом районе не выявлялись.

Проведённый нами анализ научных публикаций, посвящённых этой тематике, показал, что исследователями установлено немало фактов, когда извержения грязевых вулканов обуславливаются землетрясениями, эпицентры которых находятся на разных расстояниях от вулканов, и сейсмические волны передаются с некоторым опозданием, способствуя пробуждению вулкана не в тот день, а через несколько дней и даже недель в зависимости от дальности расстояния между вулканом и эпицентром землетрясения, магнитуды последнего и глубины его очага [Лебедев, Кулакова, 1981; Малиновский, 1938]. В генетическом отношении оба эти природные явления связаны своими проявлениями с накапливающимся в земной коре тектоническим напряжением, которое и обуславливает их взаимодействие. Таким образом, можно утверждать, что частота появления на морской поверхности загрязнений, обусловленных грязевым вулканизмом, определяется сейсмологической обстановкой в Южном Каспии.

Результаты наших многолетних спутниковых наблюдений показывают, что акватория в районе Западного борта Южно-Каспийской впадины относится к районам наиболее интенсивного загрязнения морской поверхности Каспийского моря. Загрязнение морской поверхности в этом районе обусловлено активностью грязевых вулканов на морском дне.

5.4. РИСКИ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ КАСПИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДОБЫЧИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Каспийский регион заслуживает особого внимания вследствие того, что в новом геополитическом пространстве эта территория и акватория приобрели особое значение в связи с ростом поиска, добычи и транспортировки углеводородных ресурсов, строительством международных газо- и нефтепроводов, функционированием Евразийского транспортного коридора, Великого Шёлкового пути и т.д. Промышленное освоение нефтегазовых ресурсов Каспия неминуемо становится дополнительным, а с разработкой недавно открытых очень крупных месторождений нефти и её транспортировкой на мировые рынки — и основным источником антропогенного воздействия на окружающую среду Каспийского моря [Kostianoy, 2011; Kostianoy, Kosarev, 2005; Zhiltsov et al., 2016; Zonn, 2005; Zonn, Kostianoy, 2016a].

Ряд особых физико-географических условий Каспийского моря могут также способствовать росту рисков нефтяного загрязнения Каспийского моря [Kostianoy et al., 2016; Zonn, Kostianoy, 2016b].

Учитывая, что Каспий является бессточным водоёмом, процесс обновления вод Каспия протекает очень медленно по сравнению с другими морями. Вследствие этого здесь существенно понижен порог неблагоприятного воздействия загрязняющих веществ, при котором наступают необратимые последствия в морской экосистеме. К неблагоприятным природным факторам на Каспии можно отнести штормовые ветра и экстремальные волны, ледовые условия (Северный Каспий), значительные межгодовые изменения уровня моря, сгонно-нагонные явления, опасные геолого-геоморфологические условия (землетрясения, моретрясения, газонасыщенные зоны и пр.) [Kostianou et al., 2016]. Особенностью этих факторов является весьма ограниченная возможность прогнозирования как времени их возникновения, так и тяжести их последствий.

При работах на шельфе Северного Каспия актуальны такие проблемы, как ледовые явления. Здесь акватория моря в суровые зимы сплошь замерзает сроком на 3–4 месяца (декабрь–март), толщина льда достигает 60–100 см. Это требует специальных конструктивных решений при строительстве различного рода сооружений. Взлом и подвижки льдов в открытой части Северного Каспия наблюдаются при ветрах различных направлений. На сжатие плавучих льдов влияют резкие изменения направления и скорости ветра в зоне плавучего льда. Например, в районе месторождения им. Ю. Корчагина сжатие сплочённых льдов происходит при ветрах восточных и юго-восточных направлений силой более 6 баллов. Особую опасность для стационарных сооружений, характеризующую высокой степенью риска, представляет дрейфующий лёд. Из истории известна весьма мощная атака дрейфующих льдов на металлические эстакады «Нефтяных Камней» в Азербайджане в феврале 1954 г., которая создала исключительно опасные ситуации для морских сооружений Апшеронского полуострова. В период 1925–1975 гг. дрейфующий лёд достигал Апшеронского полуострова с вероятностью один раз в 10 лет. Хотя частота таких явлений невелика, длительность эксплуатации месторождений Северного и даже Среднего Каспия требует определённого внимания к ледовой защите платформ и подводных трубопроводов [Zonn, Kostianou, 2016a].

Для мелководных участков Северного Каспия дрейфующий лёд представляет большую опасность для трубопроводов, закладка которых в грунт должна производиться на глубину, исключающую повреждения стамухами — торосистыми образованиями, сидящими на мели, как в виде отдельных торосов, так и барьеров длиной более 1 км. В середине декабря 2012 г. из-за погодных условий искусственные острова «А» и «Д» нефтяного месторождения Кашаган оказались в ледяной блокаде. Возникли перебои с продовольствием, вывозом образовавшихся гор строительного мусора [Zonn, Kostianou, 2016a].

Разработка нефтегазовых месторождений и разведочное бурение в Каспийском море находятся в зоне повышенной сейсмичности и сейсмоопасности. На севере Каспия по системе глубинных разломов происходит надвигание складчатого палеозойского комплекса эпигерцинской платформы на край докембрийской платформы; здесь же обнаружен крупный глубинный разлом Аграхано-Эмбинский, разделяющий область Северного Каспия на две части (северо-восточную и юго-восточную) и играющий очень важную роль в тектонике этой области. Южная и большая часть Среднего Каспия также подвергается значительной геодинамической опасности, связанной с сейсмичностью. Кроме того, дно Каспия подвержено грязевому вулканизму [Zonn, Kostianou, 2016a].

Нестабильность донного рельефа представляет собой отдельный фактор риска. Она вызывается периодическими изменениями интенсивности поступления осадков, что характерно для впадающих в море рек, особенно Волги. Дно Каспия — это не твёрдый грунт, а рыхлые неуплотнённые неконсолидированные породы, образующие нестабильную и чувствительную среду, склонную к оползневым подвижкам. Вызвать оползни могут извержения грязевых вулканов, выбросы газов, подводные землетрясения. В Каспийском регионе происходит до 1 тыс. землетрясений силой до 3 баллов по шкале Рихтера в год, а количество слабых толчков вообще исчисляется многими тысячами. Атырауская область Казахстана, включая акваторию Каспийского моря, относится к участкам земной коры с возможными проявлениями землетрясений магнитудой 6 баллов по шкале Рихтера. А крупные нефтяные подсолёвые месторождения нефти и газа Кашаган, Кайран, Королевское, Тенгизское как раз расположены на тектонически активных участках (рис. 5.17). Исследования, проведённые иранскими специалистами, показывают, что южный, иранский берег Каспия подвержен землетрясениям и оползням, особенно в центральной части побережья от г. Амирабад до г. Нур и от г. Энзеги до г. Резваншахра. При очень сильном землетрясении вполне возможны выбросы на поверхность и в атмосферу под давлением около 1000 атмосфер миллионов тонн углеводородов с сероводородом, что может привести к глобальной катастрофе. Особенно опасны по своим экологическим последствиям сероводородосодержащие месторождения нефти и газа (подобные Тенгизскому) [Zonn, Kostianoy, 2016a].

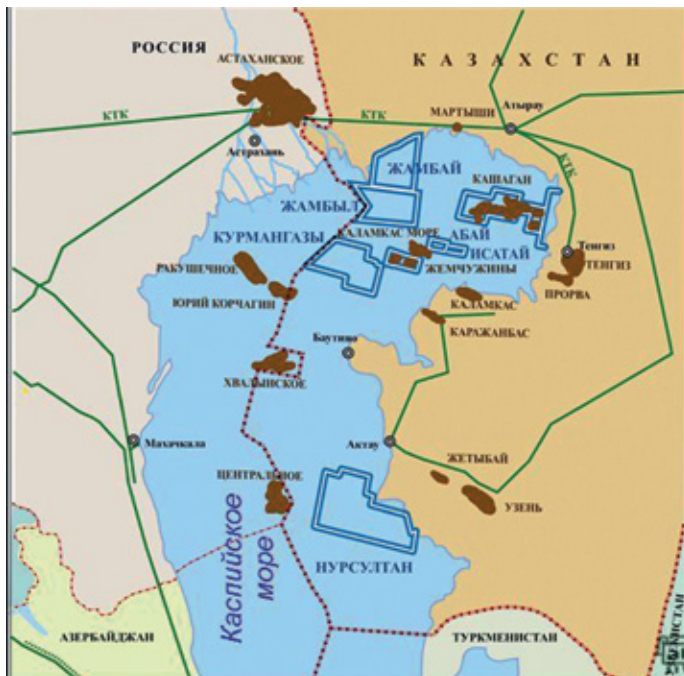


Рис. 5.17. Месторождения нефти и газа в Северном Каспии (коричневые области). Зелёные линии — трубопроводы

Считается, что казахстанский Северо-Каспийский проект по освоению шельфа — единственный в мире, где в совокупности представлены все экологические проблемы, с которыми обычно имеет дело нефтяной бизнес. В первую очередь в этом проекте рассматривается гигантское месторождение Кашаган, которое считается самым крупным после открытого в 1968 г. месторождения Прудхобей на Аляске. Месторождение Кашаган имеет аномально высокие пластовые давления (800 бар), высокое содержание сероводорода (до 15 %) и меркаптанов. Морской комплекс на Кашагане и установку по подготовке нефти и газа «Болашак» на суше вблизи аула Карабатан связывает 80-км сеть трубопроводов из нефтепровода и двух газопроводов. 9 октября 2013 г., после получения первой нефти 11 сентября 2013 г., произошли утечки газа на газопроводе в сварных швах и по телу газопровода. Причина растрескивания трубопровода — воздействие сульфидных соединений. Такие повреждения возникают, когда твёрдая/ломкая сталь подвергается воздействию высоких концентраций H_2S в присутствии воды, что приводит к появлению микротрещин в стали. Соединение H_2S в продукции месторождения Кашаган находится в числе самых высоких в мире. Лишь в июле 2014 г. министр нефти и газа Казахстана признал необходимость полной замены трубопроводов на месторождении — а это 200 км труб, стоимость которых составляет 1 млн дол. за 1 км, а по морскому дну — в полтора раза больше [Zonn, Kostianoy, 2016a].

Штормовые ветры, аварийные взрывы, пожары, ошибки персонала, поломки оборудования, непредвиденные обстоятельства — всё это приводит к авариям, которые развиваются по своему собственному сценарию. На Каспии регулярно происходили и происходят аварии, подробности которых не известны широкой общественности. Большую опасность представляют законсервированные скважины, расположенные недалеко от уреза морской воды. Именно на них приходится большая часть мини-утечек. А при повышении уровня Каспийского моря эти скважины попадают в зоны затопления. Например, только по результатам обследований в Казахстане составлен кадастр из 1383 затопленных и подтопленных нефтяных скважин на площадях и месторождениях Атырауской и Мангистауской областей, часть из которых требует немедленных изоляционно-ликвидационных работ.

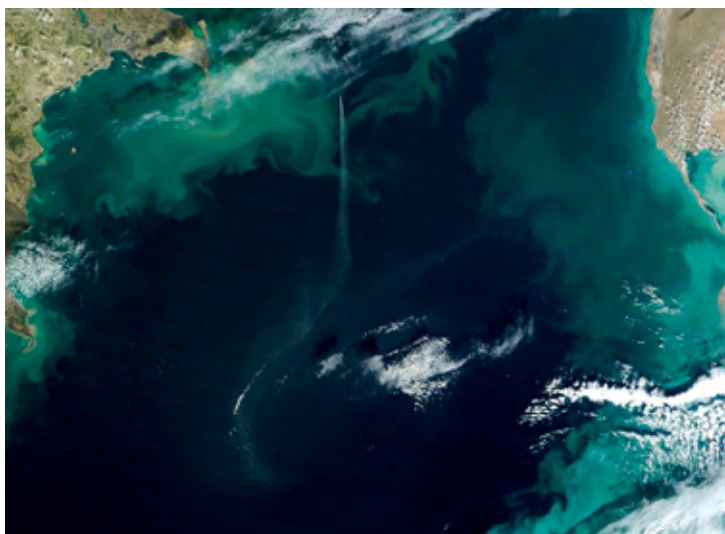
Так, например, в 1983 г. у восточного побережья Каспия затонула самоподъёмная плавучая буровая установка «60 лет Азербайджана». В ёмкостях вышки до сих пор находится 187 т дизельного топлива и 29 т машинного масла. При обследовании платформы в сентябре 2012 г. на месте аварии было обнаружено, что из устья скважины обильно сочился газ, не имеющий цвета и запаха. В 1985 г. на Тенгизе в Казахстане на скважине № 37 произошёл выброс нефти и газа в атмосферу. Гигантский пожар тушили больше года — за это время в атмосферу было выброшено 3,4 млн т нефти, 1,7 млрд $км^3$ газа, 900 тыс. т сажи в радиусе 400 км. В декабре 2008 г. произошла авария на подводной линии Нефтяные Камни — Дюбенди, которая потребовала замены части трубопровода. В 2013 г. произошёл пожар на газоразведочной скважине на месторождении «Булла-Дениз» в 80 км от Баку.

4 декабря 2015 г. на морской стационарной платформе № 10 в азербайджанской части Каспийского моря на месторождении «Гюнешли» в условиях шторма произошёл разрыв газопровода высокого давления с последующей разгерметизацией скважины. Это привело к возникновению сильного пожара, длившегося почти пять дней (рис. 5.18). На спутниковом изображении от 8 декабря 2015 г. шлейф дыма

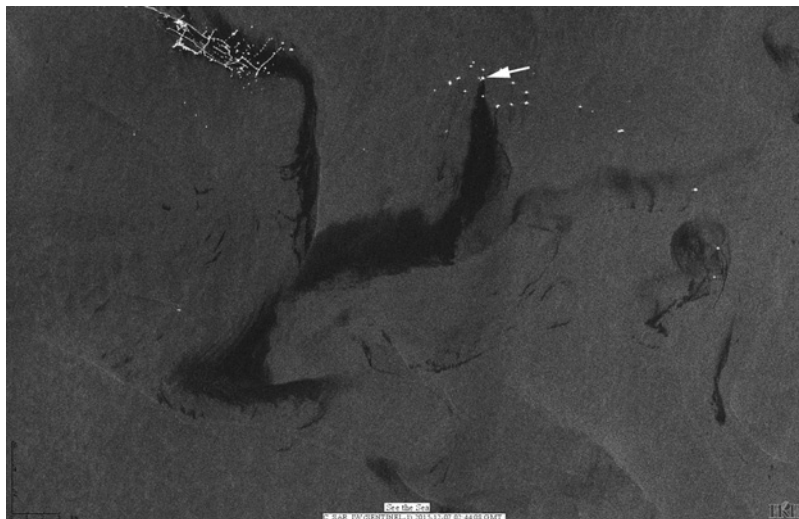
от платформы растянулся почти на 170 км и прослеживается до центра Южного Каспия (рис. 5.19). В результате этого происшествия из 63 нефтяников, работающих на платформе, погибло 32 человека. В это же время была смыта жилая будка на месторождении «Нефт Дошлары» («Нефтяные Камни») вместе с тремя нефтяниками, которыеполнили список погибших. По данным Государственной нефтяной компании Азербайджанской Республики, пожар был потушен только 17 декабря 2015 г., т.е. горение продолжалось 13 дней. Данные, полученные с европейского спутника Sentinel-1A, показали нефтяное загрязнение прилегающей акватории площадью 93 км² (рис. 5.20).



Р и с. 5.18. Пожар на морской стационарной платформе № 10 в азербайджанской части Каспийского моря на месторождении «Гюнешли» (<http://www.kaspiy.az>)



Р и с. 5.19. Шлейф дыма от горящей платформы на месторождении «Гюнешли» (MODIS Terra, 8 декабря 2015 г.)



Р и с. 5.20. Нефтяное загрязнение в районе месторождения «Гюнешли». Стрелкой отмечено место аварии (РЛИ SAR-C Sentinel-1A, 7 декабря 2015 г.)

15 декабря 2016 г. сильный ветер снёс в море часть эстакады протяжённостью около 150 метров на нефтесборном пункте номер 3 Нефтегазодобывающего управления имени Наримана Нариманова Производственного объединения Azneft в Каспийском море. Эстакада перевернулась вместе с прилегающей к ней площадкой и жилой будкой. По предварительным данным, в результате происшествия без вести пропали десять нефтяников.

В Каспийском море планируется осуществить два больших проекта строительства транскаспийских подводных трубопроводов: транспортировку до 20 млн т нефти в год казахской нефти Тенгизского и Кашаганского месторождений до Баку, а также транскаспийского газопровода Туркменистан-Азербайджан-Турция. Согласно заключениям ещё советских сейсмологов, прокладка трубопроводов по дну Каспия чревата авариями и обширными разливами нефти в результате подводных землетрясений, что в конечном итоге создаёт предпосылки для негативных экологических, а также социально-экономических последствий. Игнорирование этого может привести к реальной катастрофе экосистемы Каспия. Российское правительство выступает в принципе против прокладки любых трубопроводов по дну Каспийского моря. Вместе с тем, уже более 1000 км трубопроводов различного диаметра проложены по дну Каспийского моря, соединяющих между собой все платформы в северо-западной и северо-восточной части Каспийского моря [Zonn, Kostianou, 2016a].

Данные статистики показывают, что основными причинами аварий на объектах магистральных трубопроводов являются [Быстрова, 2009]:

- коррозионные повреждения труб, запорной и регулирующей арматуры;
- нарушения норм и правил производства работ при строительстве и ремонте, отступления от проектных решений;
- нарушения технических условий при изготовлении труб и оборудования;
- ошибочные действия эксплуатационного и ремонтного персонала;

- внешние физические (силовые) воздействия на трубопроводы, включая криминальные врезки, повлёкшие утечки, террористические, диверсионные акты и т. п.

Темпы добычи нефти заметно опережают развитие трубопроводной инфраструктуры на Каспии [Zhiltsov et al., 2016]. Поэтому важным направлением диверсификации путей экспорта становится рост объёма перевозок нефти и нефтепродуктов по Каспийскому морю. Для этих целей используются как танкерные, так и паромные перевозки железнодорожных цистерн. Однако, согласно транспортной статистике, основной объём международных перевозок нефти осуществляется нефтеналивными танкерами. Каждая из прикаспийских стран прикладывает усилия к созданию и развитию собственного танкерного флота и портовой инфраструктуры.

Нефтяные танкерные перевозки несут в себе значительные экологические риски и сопряжены с целым рядом опасностей. Водные пути на многих направлениях перегружены транспортными средствами, что увеличивает аварийный фон и снижает степень управляемости и безопасности перевозок. К сожалению, аварии на нефтяных судах и платформах происходят в мире удручающе регулярно и всегда сопровождаются масштабным загрязнением акватории и прибрежных территорий, массовой гибелью флоры и фауны. Так, например, в 2002 г. на глубине 300 м в Каспии затонул азербайджанский паром «Меркурий-2», выполнявший рейс по маршруту Баку-Актау. На поверхности образовалось нефтяное пятно 8×15 км. На дне находятся 16 цистерн с сырой нефтью по 60 т каждая. Со временем агрессивная среда разрушит металл и около 1000 т нефти попадёт в море [Zonn, Kostianou, 2016a].

В основном транспортировка нефти осуществляется через морской порт Актау (Казахстан) до порта Баку (Азербайджан) и порта Махачкала (Россия). Планируется расширение танкерных перевозок нефти с восточного побережья Каспия (месторождение Кашаган) на западное до нефтепровода Баку-Тбилиси-Джейхан в рамках проектируемой Казахстанской каспийской системы транспортировки. В связи с тем, что промышленная добыча с этого месторождения откладывается, то танкерные перевозки будут использоваться для доставки растущих объёмов нефти Тенгиза.

Следует отметить, что танкерный флот Казахстана и Азербайджана пока не отвечает требованиям экологической безопасности. Основную базу этих флотов до сих пор составляют старые суда, дедвейт которых не превышает 12 тыс. т. Национальные танкерные флоты Казахстана и Азербайджана в настоящее время начали пополняться новыми судами. Эти танкеры построены в соответствии с международными нормами безопасности и оснащены двойными бортами. Казахстан и Азербайджан уже начали подготовку к использованию крупнотоннажных танкеров в Каспийском море для ожидаемой масштабной транспортировки углеводородов. В соответствии с этими планами, осуществляется, с одной стороны, увеличение мощности существующих портов, таких как Актау (Казахстан), Туркменбаши (Туркменистан), Баку (Азербайджан), Махачкала (Россия), с другой — строительство новых портов — Курьк (Казахстан), Гарадаг (Азербайджан). Эти порты, как нефтяные терминалы, позволят принимать суда всех типов, а у выносного причального буя — крупнотоннажные танкеры до 60 тыс. т. Кроме того, создаётся специальный флот для обслуживания нефте- и газодобывающих платформ. Уже сейчас он насчитывает свыше 250 судов [Zonn, Kostianou, 2016a].

Вызывает тревогу отсутствие опыта экологической безопасности морских перевозок нефтеналивных грузов. Следует напомнить об авариях, случившихся в 2001 г. в порте Актау при загрузке танкера «Ислам Сапары», когда нефтяное пятно полностью покрыло акваторию порта; в 2002 г. — взрыв на танкере «Генерал Шихлинский» в порту Туркменбаши, и т. д. [Zonn, Kostianou, 2016a].

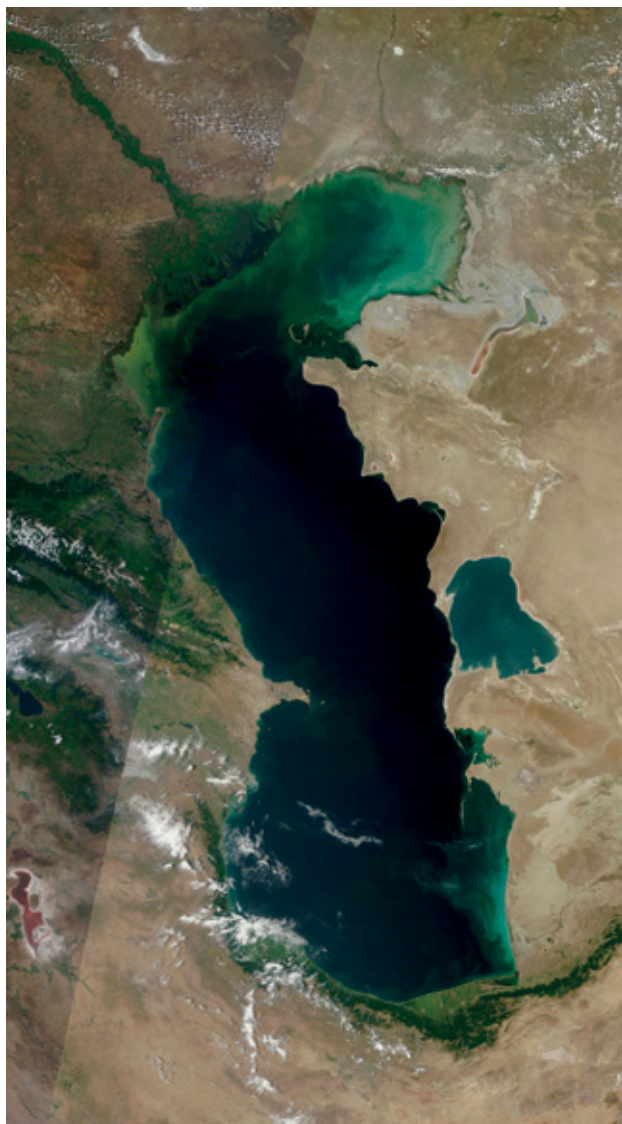
Согласно прогнозам, в ближайшее десятилетие добыча нефти на Каспии может составить 250 млн т в год (в настоящее время здесь добывается около 130 млн т). Проблемы экологической безопасности этого замкнутого водоёма решаются с большим отставанием. Можно предположить, что уже сейчас Каспий находится в начальной стадии экологической катастрофы, которая по мере развития промышленной добычи нефти и газа и их транспортировки, может обернуться трагедией. К этому следует добавить высокую сейсмичность, штормовые условия в зимний период и ряд других естественных факторов, которые могут приводить к авариям.

В этой связи необходимо отметить роль дистанционных спутниковых методов, как составной части комплексного экологического мониторинга Каспийского моря, а также объектов нефтегазовой отрасли в море и на берегу, портов и терминалов, судоходных трасс, а также действующих, строящихся и планируемых морских добывающих платформ и нефтегазопроводов. Мониторинг разливов нефти традиционными средствами контроля весьма затруднён. Вместе с тем, дистанционное зондирование Каспия показывает, что загрязнения моря нефтепродуктами в виде обширных темных пятен видны практически на каждом радиолокационном изображении (см. разд. 5.2). Уже более 20 лет на Каспии ведутся спутниковые наблюдения морской поверхности, но до сих пор ни в одной прикаспийской стране не организован постоянно действующий комплексный спутниковый мониторинг экологического состояния Каспийского моря. В этом направлении нами накоплен уже достаточно большой опыт, связанный с мониторингом Кравцовского нефтяного месторождения (нефтедобывающая платформа D-6 Лукойла) в Юго-Восточной Балтике, который ведётся с 2004 г. (см. гл. 3).

Что касается акватории Каспийского моря, то мы неоднократно в научных публикациях, в отчётах по российским и международным проектам, в докладах на российских и международных конференциях, на совещаниях с представителями министерств и ведомств, нефтегазовых компаний России, Азербайджана и Туркменистана, а также в прессе [Жильцов и др., 2010; Зонн и др., 2016] поднимали вопрос о необходимости организации постоянно действующего комплексного спутникового мониторинга Каспийского моря и даже организации Международного центра по спутниковому мониторингу Каспия в Ашхабаде. К сожалению, эта идея до сих пор так и не была реализована.

5.5. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАЛИВА КАРА-БОГАЗ-ГОЛ

На восточном берегу Каспийского моря глубоко вдаётся в сушу залив Кара-Богаз-Гол (рис. 5.21). Это название по-туркменски означает «залив Чёрная пасть». Согласно древним легендам, в заливе находилась пучина, поглощающая воды Каспия и даже суда, рискнувшие зайти в эту огромную лагуну.



Р и с. 5.21. Каспийское море и залив Кара-Богаз-Гол (MODIS Terra, 18 июля 2016 г.)

Кара-Богаз-Гол — это мелководное понижение в рельефе, с плоским дном и непостоянной береговой линией, самая обширная на Каспии лагуна размером около 18 тыс. км², отделённая от моря двумя песчаными косами (рис. 5.22). Между ними находится пролив длиной 7–9 км, шириной от 120 до 800 м и глубиной 3–6 м. Морфометрические характеристики Кара-Богаз-Гола существенно изменяются в зависимости от положения уровня моря и залива. Из-за разницы уровней Каспия и залива и в зависимости от её величины морская вода со скоростью 50–100 см/с устремляется по проливу в залив, где полностью испаряется (в среднем 800–1000 мм/год).



Р и с. 5.22. Залив Кара-Богаз-Гол (MODIS Terra, 18 июля 2016 г.)

Таким образом, при среднегодовой сумме осадков в этом районе не более 110 мм Кара-Богаз-Гол представляет собой огромный естественный испаритель морской воды. Вследствие испарения каспийской воды и собственных «вековых» запасов залива, его чашу заполняет рассол (рапа) — морская вода с солёностью 270–300 ‰. Этот рассол представляет собой концентрированный раствор солей: хлоридов натрия, магния и калия, сульфата магния и небольшого количества редкоземельных элементов [Аманниязов, Федин, 1994; Бортник, Лучков, 1988; Дзенс-Литовский, 1967; Зонн, 2004; Косарев, 1975; Лавров, 2000; Лебедев, Костяной, 2005; Терзиев и др., 1986; Kosarev, Kostianoy, 2005, Kosarev et al., 2009; 2014; Kostianoy et al., 2004b, 2014; Varushchenko et al., 2000].

Физико-географические условия Кара-Богаз-Гола, его природный режим, зависящий от уровня Каспия и стока в залив, испытывают значительные межгодовые изменения. В первые десятилетия XX в. перепад уровня между морем и заливом был невелик (около 0,5 м), и между ними существовала гидравлическая связь. Уровень Кара-Богаз-Гола находился на отметке близкой к –26,5 м относительно уровня Мирового океана, а его годовой ход отличался от годового хода уровня моря за счёт более интенсивного летнего испарения и сгонно-нагонных колебаний, достигавших 2 м. Площадь залива была более 18 тыс. км², объём вод — 130 км³, преобладающие глубины — 8–10 м. Приток воды в залив составлял 18–25 км³/год. Ежегодно в залив поступало около 330–380 млн т солей, но при этом его роль в опреснении Каспийского моря оставалась незначительной — 0,2–0,3 ‰ за последние 100 лет [Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009].

Наличие огромных запасов минералов и установившийся водно-солевой баланс между морем и заливом послужили естественной основой промышленной разработки солевых ресурсов Кара-Богаз-Гола. Общие запасы солей в заливе оцениваются миллиардами тонн. Это крупнейшие залежи сульфата натрия в Евразии, и единственное место в мире, где в естественных условиях кристаллизации минеральных солей осуществлялась их добыча в промышленном масштабе. В заливе находятся богатейшие запасы мирабилита (глауберова соль) — декагидрата сульфата натрия $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Сульфат натрия — это ценное химическое сырье, применяемое в химической, целлюлозно-бумажной, текстильной, стекольной промышленности, а также в сельском хозяйстве и медицине. Около 500 предприятий Советского Союза получали карабогазскую продукцию. В первые десятилетия XX в. добыча химического сырья основывалась на естественных природных процессах. Осенью 1926 г. был организован трест «Туркменсоль», который проводил добычу сульфата натрия на южном берегу залива у мыса Умчал. В 1929 г. создаётся единый трест «Карабогазсульфат» для промышленной добычи солей. Производство основывалось на новом бассейновом методе, когда поверхностный рассол закачивался в близлежащие сухие котловины и на их дне в результате испарения осаждался мирабилит. Рассол без сульфата спускался в другой бассейн, а мирабилит собирался специальными машинами и отправлялся потребителю [Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009].

Начиная с 1930-х гг., в связи с резким падением уровня Каспия, в природном облике Кара-Богаз-Гола произошли существенные изменения. Поступление морской воды в залив в 1939 г. уменьшилось до $6 \text{ км}^3/\text{год}$, нарушился водный баланс. В августе 1939 г. в заливе в результате насыщения его рапы началась кристаллизация поваренной соли. Уменьшение объёма вод Кара-Богаз-Гола при длительном понижении уровня моря и вызванное этим увеличение концентрации солей в рассоле, изменение его химического состава оказали отрицательное влияние на условия разработки сульфатов. По мере понижения уровня моря площадь залива сокращалась, глубины уменьшались, длина пролива увеличивалась, а его дно размывалось. Разность уровней моря и залива возросла, и в устье пролива образовался единственный в мире морской водопад высотой около $3,7 \text{ м}$ (1970). Максимальная скорость потока на водопаде превышала $2,5 \text{ м/с}$ [Kosarev, Kostianoy, 2005; Kosarev et al., 2009].

Пролив с голубоватой морской водой, текущей среди жёлтых песков, водопад с прилегающей частью залива, своеобразная фауна птиц и животных создавали неповторимый природный комплекс на пустынном восточном побережье Каспия. На мёртвых берегах Кара-Богаз-Гола дельта пролива и водопад были самым оживлённым местом. Рыбы (судак, кефаль, осетровые), проходившие пролив, скапливались около его устья. Погибшая рыба, моллюски и водоросли, а также обилие живой рыбы в проливе служили источником питания для различных видов птиц: чаек, орлов, куликов, белых и розовых пеликанов, гусей, лебедей, фламинго.

К концу 1970-х гг. сток каспийской воды в залив сократился до $5\text{--}7 \text{ км}^3/\text{год}$, уровень лагуны упал до -32 м , площадь уменьшилась до 10 тыс. км^2 , объём воды — до $20\text{--}22 \text{ км}^3$, а солёность рапы возросла до $270\text{--}300 \text{ ‰}$. С целью сокращения расхода каспийской воды и замедления падения уровня Каспия, который в 1977 г. достиг абсолютного минимума за последние 400 лет (-29 м), в марте 1980 г. пролив был перекрыт глухой песчаной дамбой, и поступление морской воды в залив прекратилось. Однако к этому времени уровень Каспия уже успел вырасти на $0,5 \text{ м}$ и в дальнейшем

продолжал быстро повышаться до 1995 г. После отделения залива началось его быстрое усыхание. На 1 декабря 1982 г. абсолютная отметка уровня лагуны составила $-33,5$ м. К концу 1983 г. площадь залива составляла всего 1000 км², объём — $0,2$ км³, а глубины — $0,1-0,3$ м. Солёность рапы достигла величины $330-380$ ‰. К середине 1984 г. залив практически полностью высох и превратился в «сухое» соляное озеро. Поверхностный слой осадившихся из рассола солей представлял собой твёрдую кристаллическую породу, состоящую преимущественно из пяти минералов: галита, астраханита, эпсомита, глауберита и гипса. На обсохшем дне залива образовались своеобразные формы рельефа в виде различных торосов, столбчатых штоков и карстовых воронок. Изоляция залива от моря вызвала химические изменения в составе солей, ухудшение качества химического сырья и усложнение технологии его переработки [Kosarev, Kostianou, 2005; Kosarev et al., 2009].

В условиях начавшегося быстрого роста уровня моря и в целях сохранения и развития уникального соляного месторождения на Каспии было принято решение восстановить сток в Кара-Богаз-Гол. В сентябре 1984 г. началась подача каспийской воды в залив в объёме $1,5-1,6$ км³/год. Ограниченное поступление морской воды не привело к активному восстановлению гидрологической и гидрохимической обстановки в заливе. В апреле 1992 г. площадь акватории составила $4,6$ тыс. км², абсолютная отметка уровня $-33,71$ м, глубины варьировали от $0,2$ до $1,4$ м. В самой глубоководной части залива отметка дна акватории составила $-35,1$ м. В июне 1992 г. дамба была ликвидирована и возобновился естественный сток морской воды в залив. Рельеф лагуны постепенно возвращался к прежним очертаниям. При высоком положении уровня Каспия в 1993–1995 гг. годовой объём стока достигал $37-52$ км³/год, значительно превысив ранее наблюдавшиеся величины. К середине 1996 г., после заполнения чаши залива, расход воды через пролив начал определяться только испарением с поверхности залива. Сток сократился до 17 км³/год в 1999 г. Разница уровней моря и залива уменьшилась с $6,9$ м в июне 1992 г. до $0,2-0,6$ м в 1996 г. (в зависимости от сезона). Между уровнями воды в море и лагуне установилась прямая связь, при которой с ростом уровня моря повышается и уровень залива, и наоборот. Процесс заполнения залива и выход на климатический режим хорошо прослеживается по данным спутниковой альтиметрии (TOPEX/Poseidon, Jason-1 и др.) с высоким пространственным ($5-6$ км) и временным ($5-10$ сут) разрешением [Лебедев, Костяной, 2005; Kosarev, Kostianou, 2005; Kosarev et al., 2009, 2014; Kostianou et al., 2014a].

С 1996 г. и по настоящее время уровень воды в заливе падает синхронно с уровнем Каспийского моря (который в июне 2016 г. находился уже на уровне $-27,72$ м). Это определяет возможность повторного, теперь уже естественного обмеления Кара-Богаз-Гола и ухудшения экологической обстановки вокруг него. Поучительная история Кара-Богаз-Гола ещё раз показала, что без комплексного и углублённого изучения экологических, экономических и социальных последствий нельзя изменять сложившиеся тысячелетиями природные равновесия, поскольку непродуманное вмешательство человека в сложные процессы, происходящие в окружающей среде, может привести к катастрофическим последствиям.

Дальнейший мониторинг уровня в различных точках акватории Каспийского моря и Кара-Богаз-Гола, площади зеркала, конфигурации берегов по спутниковым данным позволит проследить тенденции их изменений, а это чрезвычайно важно в целях проектирования, строительства и эксплуатации промышленных объектов на

акватории и берегах моря, обеспечения экологической безопасности хозяйственной деятельности на Каспии. Поскольку Российская Федерация не имеет возможности свободно проводить морские наблюдения на акватории других прикаспийских государств, то спутниковый комплексный мониторинг является безальтернативным и весьма эффективным методом исследования залива Кара-Богаз-Гол и всего Каспийского моря в целом.

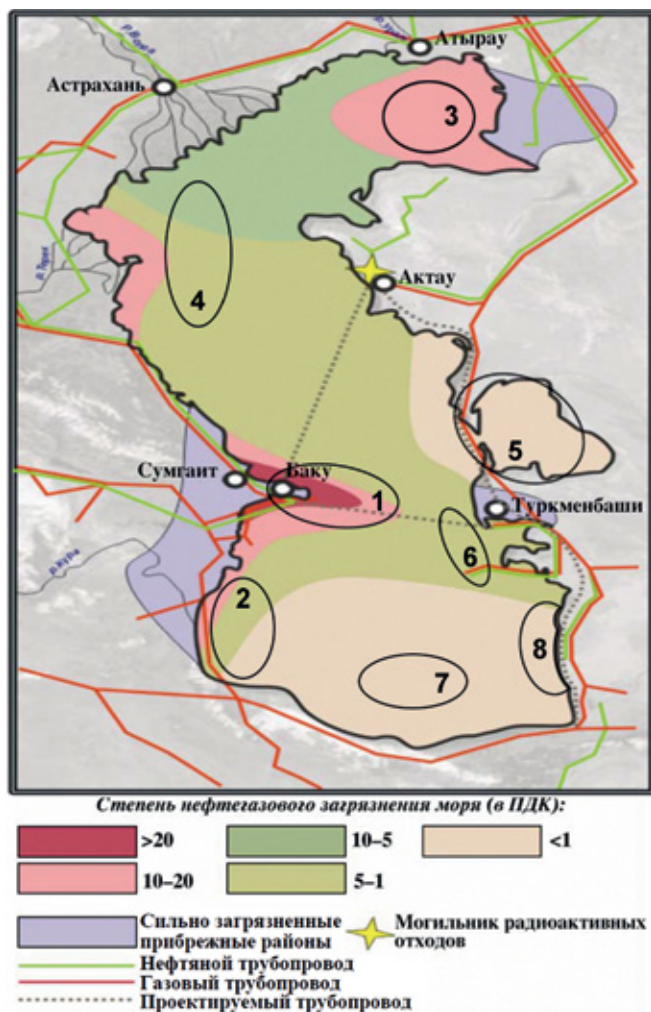
5.6. ЗОНЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Экологическое положение Каспийского моря можно охарактеризовать как крайне сложное. Воды Каспия и его поверхность существенно загрязнены нефтью и нефтепродуктами. Можно выделить несколько путей поступления углеводородов в акваторию моря.

1. Происходит естественное просачивание углеводородов из недр на поверхность моря. По современным представлениям в зоне Апшеронского порога происходит современный процесс образования нефти и газа [Гаврилов, 2007]. Углеводородный флюид из низов земной коры по трещинам, разломам просачивается в верхние пласты. Часть флюида заполняет антиклинальные перегибы пластов, образуя залежи, а не перехваченные ловушками флюиды выходят на морское дно с образованием грязевых вулканов.
2. В западной части Южного Каспия наблюдается большое количество грязевых вулканов. Согласно опубликованному данным [Дадашев, Мехтиев, 1974] через жерло грязевых вулканов в воды Каспийского моря ежегодно выбрасываются миллионы тонн нефти и миллиарды кубометров газа. Природные углеводороды частично рассеиваются в морских водах, частично испаряются в атмосферу. Существует мнение [Гаврилов, 2011], что Каспийское море, в какой-то степени, имеет некоторый иммунитет к нефтяному загрязнению, однако этого иммунитета может оказаться недостаточно, чтобы противостоять техногенному воздействию.
3. Морская нефтедобыча и транспортировка. К настоящему времени в недрах дна Каспийского моря выявлены десятки нефтяных и газовых месторождений. Наиболее активная разработка месторождений ведётся главным образом в территориальных водах Азербайджана. Однако в этот процесс включаются и нефтяные компании России, Казахстана, Туркменистана, а также международные консорциумы. Для транспортировки углеводородного сырья, добываемого на Каспийском море и на его побережье, вокруг Каспия проложены тысячи километров нефте- и газопроводов [Zhiltsov et al., 2016]. Речь идёт также о сооружении трубопроводных систем непосредственно по дну моря. При разработке морских месторождений порой происходят залповые выбросы нефти. Существенную опасность представляет собой также неконтролируемый сброс нефти и нефтепродуктов с морских промыслов и прилегающих промышленных предприятий.
4. Большую опасность представляет естественный подъем уровня Каспийского моря. При этом происходит затопление прибрежных месторождений, а это

28 действующих промыслов. Подъём уровня моря с 1978 по 1995 г. привёл к затоплению почти 800 скважин, которые были наспех законсервированы. У половины из них наблюдалось высачивание нефти.

Наиболее тяжёлая экологическая ситуация наблюдается в шельфовой зоне. В частности, утратили способность к самоочищению, т.е. стали мёртвыми воды Каспийского моря вблизи Апшеронского полуострова.



Р и с. 5.23. Схема экологического районирования Каспийского моря в зависимости от нефтяного загрязнения [Гаврилов, 2011]. Зоны экологического риска, установленные нами по результатам спутникового мониторинга, отмечены чёрными эллипсами: 1 — Апшеронский порог и Бакинский архипелаг; 2 — западная часть Южного Каспия; 3 — северо-восточный шельф Казахстана; 4 — северо-западный шельф РФ; 5 — залив Кара-Богаз-Гол; 6 — восточный шельф Туркменистана; 7 — Южный Каспий; 8 — Юго-восточная часть Каспия

На рис. 5.23 приведена схема экологического районирования Каспийского моря в зависимости от нефтяного загрязнения, предложенная в работе [Гаврилов, 2011]. Результаты спутниковых наблюдений, проводимых нами на протяжении ряда лет, в целом, согласуются с предложенным районированием. Помимо нефтяных загрязнений, как антропогенного, так и природного происхождения, к экологическим рискам можно отнести аномальное цветение водорослей, которое наблюдалось в Южном Каспии в 2005 г., и которое может повториться в будущем, и повышение мутности вод шельфовой зоны, связанное с выносом рек Волги, Терека, Куры и других в период половодья. На основании спутниковых данных нами были выявлены следующие основные зоны экологического риска в Каспийском море:

1. Апшеронский порог и Бакинский архипелаг — поступление нефти при добыче и разведочном бурении, подводном ремонте скважин, при аварийных разрывах нефтепроводов и зачистке выкидных линий.
2. Западная часть Южного Каспия — выход нефти на поверхность моря, результат грязевого вулканизма.
3. Северо-восточный шельф Казахстана — риск нефтяного загрязнения в случае аварий на морских нефтедобывающих платформах Казахстана и подводных нефтепроводах.
4. Северо-западный шельф РФ — риск нефтяного загрязнения в случае аварий на морских нефтедобывающих платформах РФ. Повышенное содержание взвешенного вещества, связанное с вытоком реки Волга в период половодья.
5. Залив Кара-Богаз-Гол — риск повторного превращения залива в соляную пустыню в случае дальнейшего падения уровня Каспийского моря
6. Восточный шельф Туркменистана — риск нефтяного загрязнения в случае аварий на морских нефтедобывающих платформах Туркменистана. Несанкционированный сброс с судов загрязнённых вод в районе судоходных трасс вблизи побережья Туркменистана.
7. Южный Каспий — аномальное цветение сине-зелёных водорослей.
8. Юго-восточная часть Каспия — интенсивное цветение фитопланктона; повышенное содержание взвеси, связанное с выносом реки Атрек во время половодья.

Наши дистанционные исследования экологического состояния Каспийского моря еще раз доказали, что необходимо объединить усилия всех прикаспийских стран по созданию единой постоянно действующей системы спутникового мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность задачи оценки экологического состояния омывающих Россию морей постоянно возрастает. Это обусловлено многими причинами: осуществление промышленной добычи углеводородного сырья на континентальном шельфе РФ создаёт риск нарушения экологического равновесия морской и геологической сред в районах проведения работ и на путях транспортировки нефтепродуктов; повышение концентрации взвешенного вещества в воде приводит к увеличению мутности вод и снижению биопродуктивности; аномальное цветение вод с каждым годом становится более продолжительным и охватывает всё большие площади, а также возникает в тех районах, где ранее не наблюдалось; возрастание масштабов внутреннего туризма и рекреационной активности на морском побережье повышает риски антропогенного загрязнения прибрежной зоны. Возникает опасность проявления негативного влияния вышеперечисленных факторов в акваториях, ранее им не подверженных. В природной среде в последние десятилетия наблюдаются достаточно быстрые изменения, и резко возрастает потребность оперативного получения объективной информации о состоянии этой среды. Получение такой информации, особенно для обширных акваторий, во многих случаях возможно только с использованием средств и методов дистанционного зондирования Земли.

В нашей монографии рассмотрены научные основы и методология количественной оценки экологического состояния морских акваторий на примерах Балтийского, Чёрного и Каспийского морей. Для этих морей на сегодняшний день решение задачи определения параметров загрязнения и динамических характеристик водной среды, влияющих на их распространение, является жизненно необходимым, а спутниковый мониторинг является единственным на сегодняшний день реальным и безальтернативным средством оперативного контроля. В то же время, эти моря существенно различаются по своим характеристикам и по термогидродинамическим процессам, происходящим в них, что будет способствовать выработке обобщённого подхода, допускающего возможность применения развитых в ходе исполнения проекта РНФ методик к различным акваториям Мирового океана.

Важное место отведено описанию усовершенствованных методик и инструментария для определения типов и масштабов загрязнений, а также для получения их количественных оценок. Отдельное внимание уделено усовершенствованию алгоритмов распознавания проявлений загрязнений морской среды различного происхождения по данным дистанционного зондирования. Указаны преимущества

и ограничения использования различных спутниковых данных и их комбинаций для выявления нефтесодержащих и биогенных плёнок на морской поверхности. Показано, что совместный анализ данных много- и гиперспектральных сенсоров оптического диапазона и радиолокационных снимков в ряде случаев помогает избавиться от неопределённостей в интерпретации радиолокационных изображений, полученных в зонах слабого ветра, где радиолокационные контрасты слабы.

Для различных акваторий Балтийского, Чёрного и Каспийского морей накоплена статистика о пространственной, сезонной и межгодовой изменчивостях проявлений в спутниковых данных различных типов загрязнений, обусловленных:

- сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты;
- выносом сточных и речных вод, содержащих плёночные загрязнения смешанного антропогенного и естественного происхождения;
- грязевым вулканизмом и естественными выходами на морскую поверхность углеводородов (метановые сипы), которые обнаруживаются в Чёрном и Каспийском морях;
- повышенной биологической продуктивностью, в том числе, связанной с жизненными циклами хлорофилла и активным цветением водорослей;
- повышенной концентрацией взвешенного вещества.

Спутниковый экологический мониторинг морской поверхности включал в себя не только выявление нефтяных, антропогенных и биогенных загрязнений, но и прогноз их распространения. В монографии показано, что прогноз распространения загрязнений возможен только на основе детального знания всей совокупности гидродинамических процессов, характерных для района мониторинга. Как показывает наш многолетний опыт спутниковых наблюдений, задачи выявления загрязнения морской среды и исследования динамических процессов, происходящих в этой среде, необходимо решать в тесной взаимосвязи, поскольку попадая в морскую среду, загрязнения становятся частью этой среды и развиваются по тем же законам, по которым развивается и сама морская среда. Разнообразие условий в реальных акваториях, влияние огромного числа факторов как внутриокеанического, так и атмосферного происхождения, при большой сложности и стоимости натуральных измерений создают определённую фрагментарность описания реальных процессов, происходящих в конкретных акваториях. Для решения многих практических задач необходимы детальные сведения о фактическом пространственно-временном распределении мезо- и субмезомасштабных процессов (вихрей, вихревых диполей, струй, внутренних волн и фронтов) в различных районах, приближенные к реальному времени. Сложные структуры течений, сопутствующие этим явлениям, проявляются на морской поверхности и могут быть зафиксированы из космоса современными средствами дистанционного зондирования.

Существенная часть наших исследований была направлена на изучение влияния динамических и циркуляционных процессов и природных факторов на изменчивость пространственно-временных распределений и интенсивность загрязнений морской среды, проявляющихся на спутниковых изображениях. Задача обнаружения и прогнозирования распространения загрязнений различной природы решалась на основе совместного использования разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности (многосенсорный подход).

Проведённые исследования позволили на основе данных спутникового дистанционного зондирования определить устойчивые зоны экологического риска, т. е. районы, наиболее подверженные нефтяным загрязнениям, «вредоносным» цветениям водорослей и повышенным концентрациям взвешенного вещества на акваториях указанных морей. Следует отметить, что оценки экологического состояния Балтийского, Чёрного и Каспийского морей произведены на основе обширного архива спутниковых данных, накопленных за более чем 10-летний период.

Область применения разработанных методик и алгоритмов, чрезвычайно широка. Полученные нами результаты научно-исследовательской работы могут быть использованы для решения одной из важнейших задач океанологии — исследования гидродинамических процессов, для развития методик спутникового мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности с учётом локальных гидродинамических процессов. Кроме того, результаты могут быть востребованы в различных проектах, выполняемых в рамках системы Министерства природных ресурсов, Росгидромета и МЧС РФ, и будут полезны для специалистов нефтегазовой отрасли, которые занимаются освоением морских нефтегазовых месторождений, оценками воздействия на окружающую среду, производственным экологическим мониторингом и контролем на стадии проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов отрасли на шельфе морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров С. В., Гришанов Г. В., Гусев А. А., Дмитриева О. А., Ежова Е. Е., Жигалова Н. Н., Карасева Е. М., Кудрявцева Е. А. (2012)* Биологические сообщества // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. 2. С. 128–152.
- Алиев И. (2003)* Каспийская нефть Азербайджана. М.: Известия, 2003. 712 с.
- Алиев Ад. А. (2006)* Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 35–51.
- Алиев Ад. А., Рахманов Р. Р. (2008)* Количественная оценка грязевулканических процессов в Азербайджане // АМЕА Хябярляри, Йер елмляри. 2008. № 2. С. 47–28.
- Аманниязов К. Н., Федин В. П. (1994)* Гара-Богаз-Гол — второе рождение. Ашгабат: Ылым, 1994. 42 с.
- Андреев В. М., Туголесов Д. Д., Хренов С. Н. (2006)* Грязевые вулканы и нефтегазопроявления российского сектора Чёрного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 50–59.
- Бедрицкий А. И., Ходкин С. С., Максимов А. А. (2001)* Основные принципы обеспечения хозяйственной и природоохранной деятельности в Каспийском регионе данными и информацией о погодно-климатических и гидрометеорологических условиях и загрязнении природной среды Каспийского моря // Вестник Каспия. 2001. № 5. С. 96–115.
- Бедрицкий А. И., Асмус В. В., Кровотыццев В. А., Лаврова О. Ю., Островский А. Г. (2007)* Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Чёрного и Азовского морей в 2003–2007 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 11. С. 5–13.
- Бедрицкий А. И., Асмус В. В., Кровотыццев В. А., Лаврова О. Ю., Островский А. Г. (2009)* Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 г. // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 5–19.
- Богусевич В. К., Замаренова Л. Н., Скина М. И. (2006)* Выявление и оценка газовыделений со дна системами акустического горизонтального лучевого зондирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. Вып. 14. С. 546–553.
- Бортник В. Н., Лучков В. П. (1988)* Изменения состояния залива Кара-Богаз-Гол в условиях ограниченной подачи морских вод // Метеорология и гидрология. 1988. № 9. С. 113–119.
- Булатов М. Г., Кравцов Ю. А., Лаврова О. Ю., Литовченко К. Ц., Митягина М. И., Раев М. Д., Сабинин К. Д., Трохимовский Ю. Г., Чурюмов А. Н., Шуган И. В. (2003а)* Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
- Булатов М. Г., Кравцов Ю. А., Кузьмин А. В., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Раев М. Д., Скворцов Е. И. (2003б)* Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999–2002). М.: КДУ, 2003. 143 с.

- Булычева Е. В.* (2012) Нефтяное загрязнение поверхности моря в 2006–2009 гг. по данным спутниковой радиолокации // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. 2: Море. Калининград: Янтарный сказ, 2012. С. 518–529.
- Булычева Е. В., Костяной А. Г.* (2011) Результаты спутникового мониторинга нефтяного загрязнения юго-восточной части Балтийского моря в 2006–2009 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 74–83.
- Булычева Е. В., Костяной А. Г.* (2014) Итоги спутникового мониторинга нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики за 2004–2013 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 111–126.
- Булычева Е. В., Крек А. В., Костяной А. Г.* (2016а) Нефтяное загрязнение Юго-Восточной Балтики по спутниковым наблюдениям и натурным данным // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 81–89.
- Булычева Е. В., Крек А. В., Костяной А. Г.* (2016б) Межгодовая изменчивость нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики в 2004–2015 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 74–84.
- Буканова Т. В.* (2014) Тенденция эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным: автореф. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2014. 23 с.
- Быстрова А. К.* (2009) Проблемы транспортной инфраструктуры и экологии в Каспийском регионе (добыча и экспортные перевозки углеводородов). М.: ИМЭМО РАН, 2009.
- Витюк Д. М.* (1979) О величине вклада твёрдого стока рек во взвешенное вещество морской воды // Биология моря. 1979. Вып. 51. URL: http://vuzlib.com.ua/articles/book/18416-O_velichine_vklada_tverdogo_st/1.html.
- Гаврилов В. П.* (2007) Мобилистские идеи в геологии нефти и газа // Геология нефти и газа. 2007. № 2. С. 41–48.
- Гаврилов В. П.* (2011) Экологические проблемы Каспийского моря // Тр. РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2011. № 4 (265). С. 37–45.
- Гаджиев А. Н., Багирова У. А.* (2010) Морфогенетическая классификация грязевых вулканов в Азербайджанской акватории Каспийского бассейна // Тр. ИГНАНА. 2010. № 37. С. 100–114.
- Гидрометеорологический режим Вислинского залива (1971) / авт.: И. Баушис, М. П. Беляева, Д. Вельбинская и др.; под ред. Лазаренко Н. Н., Маевского А. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 279 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. (1991) Проект «Моря СССР». Т. 4. Чёрное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991, 429 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР (1992а) Проект «Моря СССР». Т. 6. Каспийское море. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 356 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей (1992б). Проект «Моря». Т. 3. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиева. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 359 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей (1994). Балтийское море. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / под ред. Ф. С. Терзиева. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. Т. 3. Вып. 2. 436 с.
- Гинзбург А. И.* (1994) Процессы горизонтального водообмена в приповерхностном слое Чёрного моря // Исслед. Земли из космоса. 1994. № 2. С. 75–83.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Станичный С. В.* (2000) Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Чёрного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения) // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 1. С. 3–14.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* (2003) Мезомасштабная изменчивость Чёрного моря по альтиметрическим данным TOPEX/Poseidon и ERS-2. // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 3. С. 34–46.

- Гинзбург А. И., Булычева Е. В., Костяной А. Г., Соловьев Д. М. (2015) О роли вихрей в распространении нефтяных загрязнений по акватории Юго-Восточной Балтики (по данным спутникового мониторинга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 149–157.
- ГОСТ 19179-73 (1988). Гидрология суши. Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 1988. Переизд.
- Гриневецкий С. Р., Зонн И. С., Жильцов С. С. (2015) Чёрное море: Энциклопедия. Сер. Моря России. М.: Международные отношения, 2015. 664 с.
- Гришин Н. Н. (1982) Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. 160 с.
- Гришин Н. Н. (2007а) Оценка воздействия на окружающую среду российской секции морского газопровода Nord Stream в рамках национального законодательства // Экологическая экспертиза и оценка воздействия на окружающую среду. М.: Изд-во ЦЕНТРЭКОПРОЕКТ, 2007. № 2. С. 50–60.
- Гришин Н. Н. (2007б) Оценка воздействия на окружающую среду проекта Nord Stream в рамках Конвенции Эспо // Докл. 7-го Международного экологического форума «День Балтийского моря». Санкт-Петербург, 22–23 марта 2007. СПб.: Изд-во «Диалог», 2007. С. 220–222.
- Гришин Н. Н. (2011) Чистые воды Балтики. Распространение взвешенных наносов. // Государственное управление ресурсами / Минприроды России. 2011. № 9. С. 34–45.
- Гришин Н. Н., Костяной А. Г. (2012) О спутниковом мониторинге переноса взвешенного вещества во время строительства морского газопровода Nord Stream в российских водах Балтийского моря в 2010 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 167–175.
- Гришин Н. Н., Костяной А. Г. (2013) Использование спутникового мониторинга распространения взвешенных наносов для трансграничной оценки воздействия на окружающую среду строительства российской секции морского газопровода Nord Stream // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 303–319.
- Громов Б. В. (1996) Цианобактерии в биосфере // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 33–39.
- Гурова Е. С., Иванов А. Ю. (2011) Особенности проявления гидродинамических структур в юго-восточной части Балтийского моря по данным спектрорадиометров MODIS и космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 4. С. 41–54.
- Дадашев Ф. Г., Мехтиев А. А. (1974) Грязевые вулканы Каспийского моря // Изв. АН Азерб. ССР. 1974. Сер. Наук о Земле. № 5. С. 26–32.
- Демидов А. Н., Мысленков С. А., Гриценко В. А., Чугаевич В. Я., Султанов П. А., Писарева М. Н., Сильвестрова К. П., Полухин А. А. (2011) Особенности структуры и динамики вод прибрежной части Балтийского моря вблизи Самбийского полуострова // Вестн. МГУ. Сер. География. 2011. № 1. С. 41–47.
- Джаошвили Ш. (2002) Реки Чёрного моря: техн. отчёт. № 71 / Европейское агентство по охране окружающей среды. 2002. 58 с. Режим доступа: http://www.eea.europa.eu/ru/publications/technical_report_2002_71/at_download/file.
- Дзенс-Литовский А. И. (1967) Кара-Богаз-Гол. Л.: Недра, 1967. 96 с.
- Добровольский А. Д., Залогин Б. С. (1982) Моря СССР. М.: Изд-во МГУ. 1982. 192 с.
- Документация по оценке воздействия на окружающую среду, разработанная Nord Stream, для проведения консультаций в рамках Конвенции Эспо (2009): Отчёт Эспо по Проекту Nord Stream: Приложение: Обзор национальной ОВОС — Россия. 2009. 79 с. Режим доступа: http://studydoc.ru/doc/2387160/otchet-e-spo---obzor-nacional._noj-ovos---rossiya.
- Доронин Ю. П. (1986) Региональная океанология. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 304 с.
- Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. (2011) Метановые сипы в Чёрном море. Средообразующая и экологическая роль / под ред. Г. Г. Поликарпова. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 405 с.

- Ермаков С. А. (2010).* Влияние плёнок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
- Ермаков С. А., Капустин И. А. (2010)* Экспериментальное исследование расширения турбулентного следа надводного судна // Изв. Рос. академии наук. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 565–570.
- Ермаков С. А., Пелиновский Е. Н., Талипова Т. Г. (1982)* Плёночный механизм воздействия внутренних волн на ветровую рябь // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький: ИПФ, 1982. С. 31–51.
- Ермаков С. А., Панченко А. Р., Талипова Т. Г. (1985)* Подавление высокочастотных ветровых волн искусственно-созданными поверхностными плёнками // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. С. 76–82.
- Есюкова Е. Е. (2013)* Результаты еженедельного мониторинга побережья Вислинского залива в районе пос. Прибрежный в 2011–2012 годах // Вестн. Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. 2013. № 1. С. 82–91.
- Жильцов С. С., Костяной А. Г., Зонн И. С. (2010)* Ждёт ли Каспий судьба Мексиканского залива? // Независимая газета: Энергия. 14 сент. 2010.
- Журбас В. М., Завьялов П. О., Свиридов А. С., Лыжков Д. А., Андрулионис Е. Е. (2011)* О переносе стока малых рек вдольбереговым бароклинным морским течением // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 440–449.
- Завьялов П. О., Маккавеев П. Н., Коновалов Б. В., Осадчиев А. А., Хлебопашев П. В., Пелевин В. В., Грабовский А. Б., Ижицкий А. С., Гончаренко И. В., Соловьев Д. М., Полухин А. А. (2014)* Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Чёрного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
- Затягалова В. В. (2012).* О некоторых особенностях естественных выходов углеводорода в восточной части Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 194–201.
- Зацепин А. Г., Гинзбург А. И., Евдошенко М. А. и др. (2002)* Вихревые структуры и горизонтальный водообмен в Чёрном море // Комплексные исследования северо-восточной части Чёрного моря / под ред. А. Г. Зацепина, М. В. Флинта. М.: Наука, 2002. С. 55–81.
- Зацепин А. Г., Корж А. О., Кременецкий В. В., Островский А. Г., Поярков С. Г., Соловьев Д. М. (2008)* Изучение гидрофизических процессов на шельфе и верхней части континентального склона Чёрного моря с использованием традиционных и новых методов измерений // Океанология. 2008. Т. 48. № 4. С. 510–519.
- Зацепин А. Г., Баранов В. И., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кременецкий В. В., Островский А. Г., Соловьев Д. М. (2011)* Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Чёрного моря и порождающие их механизмы // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 592–605.
- Зацепин А. Г., Островский А. Г., Кременецкий В. В., Низов С. С., Пиотух В. Б., Соловьев В. А., Швоев Д. А., Цибульский А. Л., Куклев С. Б., Куклева О. Н., Москаленко Л. В., Подымов О. И., Баранов В. И., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кубряков А. А., Соловьев Д. М., Станичный С. В. (2014)* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Чёрного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 16–29.
- Зацепин А. Г., Сильвестрова К. П., Куклев С. Б., Пиотух В. Б., Подымов О. И. (2016)* Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Чёрном море // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 203–214.
- Зонн И. С. (2004)* Каспийская энциклопедия / под ред. А. Н. Косарева. М.: Международные отношения, 2004. 461 с.
- Зонн И. С., Костяной А. Г., Жильцов С. С., Семенов А. В. (2015а)* Балтийское море: Энциклопедия. Сер. Моря России. М.: Международные отношения, 2015. 576 с.

- Зонн И. С., Костяной А. Г., Косарев А. Н., Жильцов С. С. (20156)* Каспийское море: Энциклопедия. Сер. Моря России. М.: Международные отношения, 2015. 544 с.
- Зонн И. С., Жильцов С. С., Костяной А. Г. (2016)* Звонок о катастрофе. Добыча углеводородов на Каспии угрожает экологии // Независимая газета: Энергия. 13 апр. 2016. URL: http://www.ng.ru/energy/2016-04-13/9_catastrophe.html.
- Иванов В. А., Лисиченко А. Д. (2002)* Внутренние волны в шельфовой зоне и у кромки шельфа в Чёрном море // Морской гидрофиз. журн. 2002. № 6. С. 67–73.
- Иванов В. А., Серебряный А. Н. (1985)* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. С. 648–656.
- Иванов М. К., Конюхов А. И., Кульницкий Л. М. и др. (1989)* Грязевые вулканы в глубоководной части Чёрного моря // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1989. № 3. С. 48–54.
- Иванов А. Ю., Голубов Б. Н., Затягалова В. В. (2007)* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
- Калашикова Н. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Серебряный А. Н. (2013)* Влияние вихревых структур на распространение загрязнений в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 228–240.
- Конвенция об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте. (1991) / ЕЭК ООН. N.Y., Geneva, 1991. (http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/env_assessment.shtml.)
- Коняев К. В. (1975)* Экспериментальное исследование короткопериодных внутренних волн в море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1975. Т. 11. № 3. С. 285–296.
- Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В. (2006)* Разработка и использование региональных алгоритмов для расчёта биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 99–105.
- Копелевич О. В., Вазюля С. В., Салинг И. В., Шеберстов С. В., Буренков В. И. (2015)* Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2014 гг.» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 99–110.
- Копелевич О. В., Вазюля С. В., Шеберстов С. В., Буканова Т. В. (2016)* Взвешенное вещество в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики по спутниковым данным // Океанология. 2016. Т. 56. № 1. С. 51–59.
- Косарев А. Н. (1975)* Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1975. 272 с.
- Костяной А. Г. (2003)* Оценка изменчивости базовых термогидродинамических параметров вод Каспийского моря и её влияния на эволюцию его экологического состояния: отчёт за 2003 г. по проекту ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 гг. / Минпромнауки РФ. М.: ИОРАН, 2003. 98 с.
- Костяной А. Г., Бульчева Е. В. (2014)* Численное моделирование рисков нефтяного загрязнения Юго-Восточной Балтики и Финского залива // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 56–75.
- Костяной А. Г., Лобковский Л. И. (2003)* Спутниковый мониторинг Каспийского моря // Вестн. Каспия. 2003. № 6. С. 56–65.
- Костяной А. Г., Тетушкина Е. С. (2010)* О необходимости спутникового мониторинга строительства морского газопровода «Норд Стрим» в Балтийском море: тез. докл. // 8-я Всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 15–19 ноября 2010. С. 214.

- Костяной А. Г., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2009)* Комплексный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения морей России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем / ред. Ю. А. Израэль. 2009. Т. 22. С. 235–266.
- Костяной А. Г., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2010)* Мелкомасштабные вихри Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 248–259.
- Костяной А. Г., Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю., Лебедев С. А., Станичный С. В., Соловьев Д. М., Сирота А. М. (2012)* Нефть и окружающая среда Калининградской области // Комплексный оперативный спутниковый мониторинг в 2004–2005 гг. Калининград: Янтарный сказ, 2012. Т. 2. Море. С. 483–518.
- Костяной А. Г., Булычева Е. В., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю., Соловьев Д. М., Сирота А. М. (2016)* Беспрецедентный случай нефтяного загрязнения морской поверхности с судна в Юго-Восточной Балтике 23 июля 2016 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 277–281.
- Кронберг П. (1988)* Дистанционное зондирование Земли. М.: Мир, 1988. 350 с.
- Круглякова Р. П., Круглякова М. В., Шевцова Н. Т. (2009)* Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Чёрном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 1. С. 37–51.
- Лавров Д. А. (2000)* Гидрологический режим залива Кара-Богаз-Гол в условиях свободного доступа морской воды // Экологические проблемы Каспия: сб. докл. Международного научного семинара по экологическим проблемам прикаспийского региона. Москва, 1–3 дек. 1999. Москва, Киров, 2000. С. 17–21.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2012)* Спутниковый мониторинг плёночных загрязнений поверхности Чёрного моря // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2016)* Особенности проявления на спутниковых изображениях гидродинамических процессов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1-2. С. 145–160.
- Лаврова О. Ю., Сабинин К. Д. (2016)* Проявление тонкой структуры течений на спутниковом радиолокационном изображении Балтийского моря // Докл. Академии наук, 2016. Т. 467. № 6. С. 713–717.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г., Литовченко К. Ц. (2005)* Радиолокационный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений в прибрежной зоне российских морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. С. 124–130.
- Лаврова О. Ю., Каримова С. С., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю. (2010)* Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Чёрного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 годах // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 168–185.
- Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А. (2011a)* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 472 с.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. (2011b)* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Докл. Академии наук. 2011. Т. 436. № 3. С. 407–411.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Каримова С. С., Бочарова Т. Ю. (2012)* Применение радиолокаторов RADARSAT-2 и TerraSAR-X для исследования гидродинамических процессов в океане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 312–323.
- Лаврова О. Ю., Серебряный А. Н., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю. (2013)* Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части

- Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
- Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Соловьев Д. М., Голенко М. Н., Голенко Н. Н., Калашишникова Н. А., Демидов А. Н. (2014a)* Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод Калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А. (2014b)* Выявление и распознавание различных типов вод в прибрежной зоне Чёрного моря и в озёрах Крыма на основе анализа гиперспектральных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 135–147.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. (2015)* Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 98–129.
- Лебедев С. А., Костяной А. Г. (2004)* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // Вестн. Каспия. 2004. № 3. С. 82–101.
- Лебедев С. А., Костяной А. Г. (2005)* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр «МОРЕ» Международного ин-та океана, 2005. 366 с.
- Лебедев Л. И., Кулакова Л. С. (1981)* Грязевой вулканизм Южного Каспия // Проблемы геологии и нефтегазоносности впадин внутренних морей. М.: Наука, 1981. С. 38–30.
- Лисиченко А. Д. (2005)* Интенсивные внутренние волны в Чёрном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сб. научн. тр. 2005. Вып. 12. С. 49–60.
- Лисицын А. П. (1974)* Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 440 с.
- Литовченко К. Ц., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Иванов А. Ю., Юренко Ю. И. (2007)* Нефтяные загрязнения восточной части Чёрного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 81–94.
- Лонгинов В. В. (1973)* Очерки литодинамики океана. М.: Наука, 1973. 244 с.
- Лупян Е. А., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Флитман Е. В. (2004)* Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 81–88.
- Лупян Е. А., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Флитман Е. В., Крашенинникова Ю. С. (2011)* Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.
- Лупян Е. А., Матвеев А. А., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2012)* Спутниковый сервис See the Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
- Маляв Р. А. (1966)* Загрязнение Каспийского моря и его отрицательное влияние на рыбное и другие отрасли народного хозяйства // Загрязнение Волго-Каспия и перспективы рыбного хозяйства. Астрахань, 1966. С. 49–62.
- Малиновский Н. В. (1938)* Сейсмь, сопровождающие грязевые извержения // Тр. АзФАН СССР. Физико-химические науки. 1938. Т. 3/38. С. 65–74.
- Мамедов Р. М. (2007)*. Гидрометеорологическая изменчивость и экогеографические проблемы Каспийского моря. Баку: «ЭЛМ», 2007. 433 с.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. (2009)* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Чёрного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.

- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. (2012)* Многолетний комплексный спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений поверхности Балтийского и Каспийского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 269–288.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. (2014)* Особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях корабельных следов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 73–87.
- Митягина М. И., Чурюмов А. Н. (2006)* Механизмы формирования радиолокационного сигнала в области нефтяного загрязнения на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 135–139.
- Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю. (2015)* Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 130–149.
- Назирова К. Р., Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю. (2016)* Исследование влияния субмезомасштабной динамики вод на распространение загрязнений в северо-восточной части Чёрного моря на основе данных подспутниковых измерений в 2014–2016 гг.: докл. // 14-я Всерос. открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 14–18 нояб. 2016. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/pdf/14/5953_Nazirova-IKI-2016.pdf.
- Немировская И. А., Сивков В. В., Бульчева Е. В. (2011)* Содержание и состав углеводов в районе месторождения Кравцовское Балтийского моря // Докл. РАН. 2011. С. 520–525.
- Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. 2. Море. (2012) / под ред. В. В. Сивкова. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. 2. 576 с.
- Овчинников И. М., Титов В. Б. (1990)* Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Чёрного моря // Докл. АН СССР, 1990. Т. 314. № 5. С. 1236–1239.
- Орадовский С. Г., Юрковский А. К. (1989)* Биогенные вещества // Основные тенденции эволюции экосистемы: Международный проект «Балтика»: сб. науч. тр. Л.: Гидрометеоздат, 1989. Вып. 4. С. 79–90.
- Орадовский С. Г., Кузнецова И. М., Игнатченко А. В. и др. (1992)* Основные результаты экологических исследований открытой части Балтийского моря в мае 1991 г. // Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1991 год: сб. науч. тр. ВНИИГМИ-МЦД. Обнинск, 1992. С. 220–242.
- Отчёт об экологическом мониторинге при строительстве российского сектора морского газопровода Nord Stream за 2010 год. (2011) Nord Stream AG. М., 2011. 342 с.
- Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Нежданов А. И. и др. (1989)* Явление активного газовыделения из поднятий на свале глубин западной части Чёрного моря // Докл. АН УССР. 1989. Сер. Б. № 12. С. 13–15.
- Проект строительства морского газопровода Nord Stream (российский сектор). (2008) Т. 8. Охрана окружающей среды. Кн. 1. Морской участок. Ч. 1. Оценка воздействия на окружающую среду. Nord Stream AG / ООО «Питер Газ». М.: Питер Газ, 2008. 802 с.
- Романкевич Е. А., Айбулатов Н. А. (2004)* Геохимическое состояние морей России и здоровье человека // Вестн. Отделения наук о Земле РАН. 2004. № 1(22).
- Савчук О. П. (2005)* Исследование эвтрофикации Балтийского моря // Исслед. океанов и морей: тр. ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 272–285.
- Серебряный А. Н., Лаврова О. Ю. (2008)* Антициклонический вихрь на шельфе северо-восточной части Чёрного моря: совместный анализ космических снимков и данных акустического зондирования толщи моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 206–215.

- Сильвестрова К. П., Мысленков С. А., Зацепин А. Г., Краюшкин Е. В., Баранов В. И., Самсонов Т. Е., Куклев С. Б. (2016)* Возможности использования GPS-дрифтеров для исследования течений на шельфе Чёрного моря // *Океанология*. 2016. Т. 56. № 1. С. 159–166.
- Синицына Н. Н., Субботин А. А., Савоськин В. М. и др. (1997)*. Влияние загрязняющих стоков на морские экологические системы Чёрного моря и поиск методов их расчёта и контроля // *Сб. тр. научн. конф. «Диагноз состояния экосистемы Чёрного моря и зоны сопряжения суши и моря»*. 29 сент. – 3 окт. 1997 г. Севастополь. С. 81–85.
- Терзиев Ф. С., Гоптарев Н. П., Бортник В. Н. (1986)* Проблема залива Кара-Богаз-Гол // *Водные ресурсы*. 1986. № 2. С. 64–71.
- Толтин В. А., Балаиов И. В., Ефремов В. Ю., Лулян Е. А., Прошин А. А., Уваров И. А., Флитман Е. В. (2011)* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.
- Туголесов Д. А., Горшков А. С., Мейснер Л. Б. и др. (1985)*. Тектоника мезо-кайнозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985. 215 с.
- Уваров И. А., Лулян Е. А., Матвеев А. М., Мазуров А. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И. (2014)* Организация работы с данными спутниковых гиперспектральных наблюдений для исследования процессов в Мировом океане // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 1. С. 200–212.
- Фащук Д. Я., Шапоренко С. И. (1995)* Загрязнение прибрежных вод Чёрного моря: источники, современный уровень, межгодовая изменчивость // *Водные ресурсы*. 1995. Т. 22. № 3. С. 273–281.
- Шнюков Е. Ф., Клещенко С. А. (2001)* Грязевой вулканизм западного суббассейна Чёрного моря // *Геологические проблемы Чёрного моря*. Киев, 2001. С. 121–144.
- Шнюков Е. Ф., Созанский В. И., Муравейник Ю. А. (2001)* О газонефтеносности Чёрного моря // *Геологические проблемы Чёрного моря*. Киев, 2001. С. 23–34.
- Шнюков Е. Ф., Коболев В. П., Русаков О. М., Маслаков Н. А. (2005)* Метан в осадках и водной толще Чёрного моря: формирование, пути переноса и роль в углеродном цикле (обзор материалов международного семинара) // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2005. № 2. С. 135–149.
- Юровская М. В., Кудрявцев В. Н., Шапрон Б., Дулов В. А. (2014)* Интерпретация оптических спутниковых изображений Чёрного моря в зоне солнечного блика // *Морской гидрофиз. журн.* 2014. № 4. С. 68–82.
- Alpers W. (1985)* Theory of radar imaging of internal waves // *Nature*. 1985. V. 314. P. 245–247.
- Ambjörn C. (2004)* Forecasts of the trajectory and fate of spills, using Internet as the calculation platform // *Abstr. USA-Baltic Intern. Symp. “Advances in Marine Environmental Research, Monitoring and Technologies”*. Klaipeda, Lithuania, 15–17 June 2004.
- Ambjörn C. (2006)* Seatrack Web, forecast of oil spills, the new version 2.0 // *Abstr. US/EU–Baltic Intern. Symp. “Integrated Ocean Observation Systems for Managing Global and Regional Ecosystems Using Marine Research, Monitoring and Technologies”*. May 23–25, 2006, Klaipeda, Lithuania.
- Apel J. R., Byrne H. M., Proni J. R., Chrnell R. L. (1975)* Observations of oceanic internal and surface waves Earth Resources Technology satellite // *JGR*. 1975. V. 80. No. 6. P. 865–881.
- Berdeal I., Hickey B., Kawase M. (2002)* Influence of wind stress and ambient flow on high discharge river plume // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107(C9). P. 3130. doi: 10.1029/2001JC000932.
- Beardall J., Stojkovic S., Larsen S. (2009)* Living in a high CO₂ world: impacts of global climate change on marine phytoplankton // *Plant Ecology and Diversity*. 2009. V. 2. P. 191–205. <http://dx.doi.org/10.1080/17550870903271363>.

- Bowden K. (1984)* Physical oceanography of coastal waters / Ellis Horwood Ser. Mar. Sci. John Wiley and Sons, Inc., Somerset. N. Y., 1984. 302 p.
- Brekke C., Solberg A. H. S. (2005)* Oil spill detection by satellite remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 95. No. 1. P. 1–13.
- Brandon S. (1995)* Oil on troubled waters // Focus Central Asia. 1995. No. 22. P. 12–16.
- Bulycheva E., Kuzmenko I., Sivkov V. (2014)* Annual sea surface oil pollution of the south-eastern part of the Baltic Sea by satellite data for 2006–2013 // Baltica. 2014. V. 27. Special Iss. P. 9–14.
- Bulycheva E. V., Krek A. V., Kostianoy A. G., Semenov A. V., Joksimovich A. (2015)* Oil Pollution of the Southeastern Baltic Sea by satellite remote sensing data and in-situ measurements // Transport and Telecommunication. 2015. V. 16. No. 4. P. 296–304.
- Bulycheva E. V., Krek A. V., Kostianoy A. G., Semenov A. V., Joksimovich A. (2016)* Oil pollution in the Southeastern Baltic Sea by satellite remote sensing data in 2004–2015 // Transport and Telecommunication. 2016. V. 17. No. 2. P. 155–163.
- Burkholder J. M. (1998)* Implications of harmful microalgae and heterotrophic dinoflagellates in management of sustainable marine fisheries // Ecol. Appl. 1998. V. 8. P. S37–S62.
- Chapron B., Collard F., Arduin F. (2005)* Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. No. C07008. doi: 10.1029/2004JC002809.
- Crocker R. I., Matthews D. K., Emery W. J., Baldwin D. G. (2007)* Computing Coastal Ocean Surface Currents From Infrared and Ocean Color Satellite Imagery // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 2. P. 435–447.
- Chubarenko B., Margonski P. (2008)* The Vistula Lagoon: Ch. 8 // Ecology of Baltic Coastal Waters / ed. U. Schiewer. Ser. Ecological Studies. V. 197. Springer-Verlag, 2008. P. 167–195.
- da Silva J. C. B., Helfrich K. R. (2008)* Synthetic Aperture Radar Observations of Resonantly Generated Internal Solitary Waves at Race Point Channel (Cape Cod) // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. Iss. C11. P. C11016. doi: 10.1029/2008JC005004.
- da Silva J. C. B., New A. L., Magalhaes J. M. (2011)* On the structure and propagation of internal solitary waves generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean, Deep Sea Research: Pt. 1. 2011. V. 58. P. 229–240. doi: 10.1016/j.dsr.2010.12.003.
- Darecki M., Stramski D. (2004)* An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89. No. 3. P. 326–350.
- Darecki M., Ficek D., Krezel A., Ostrowska M., Majchrowski R., Wozniak S. B., Bradtke K., Dera J., Wozniak B. (2008)* Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM): Pt. 2: Empirical validation // Oceanologia. 2008. V. 50. No. 4. P. 509–538.
- Davis T. W., Berry D. L., Boyer G. L., Gobler C. J. (2009)* The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms // Harmful Algae. 2009. V. 8. Iss. 5. P. 715–725.
- DiGiacomo P. M., Holt B. (2001)* Satellite observations of small coastal ocean eddies in the Southern California Bight // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 22,521–22,543.
- Doerffer R., Schiller H. (1997)* Pigment index, sediment and gelbstoff retrieval from directional water leaving radiance reflectances using inverse modelling technique // Algorithm Theoretical Basis Document ATBD. 1997. V. 2. P. 12.1–12.73.
- Dreschler-Fischer L., Lavrova O., Seppke B., Gade M., Bocharova T., Serebryany A., Bestmann O. (2014)* Detecting and tracking small scale eddies in the Black sea and the Baltic sea using high-resolution RADARSAT-2 and TERRASAR-X imagery (DTEDDIE) // Proc. Intern. Geosci. Remote Sens. Sympos. (IGARSS) 2014. Québec City, Canada, 13–18 July 2014. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE Intern. 2014. P. 1214–1217. 10.1109/IGARSS.2014.6946650.
- Edler L. (1975)* Qualitative analysis of phytoplankton // Medd. Havsfiskelab., Lysekil. 1975. No. 179. P. 67–110.

- Eidler L. (1979)* Phytoplankton succession in the Baltic Sea // *Acta Bot. Fenica*. 1979. V. 110. P. 75–78.
- Ecology of Baltic Coastal Waters. Ser. Ecological Studies (2008)* / ed. Schiewer U. 2008. V. 197. Springer, 2008. 430 p.
- Eldevik T., Dysthe K. B. (2002)* Spiral eddies // *J. Phys. Oceanogr.* 2002. V. 32. No. 3. P. 851–869.
- Elmgren R. (1989)* Man's impact on the ecosystem of the Baltic Sea: energy flows today and at the turn of century // *Ambio*. 1989. V. 18. P. 326–332.
- Ermakov P. N., Cherevichenko E. O., Kostianoy A. G. (2007)* Industrial environmental monitoring and control of the environmental legislation in construction and operation of the offshore section of the North-European Gas Pipeline // *Proc. 8th Intern. Environmental Forum "Baltic Sea Day"*. St.-Petersburg, 21–23 March 2007. St.-Petersburg: "Dialog" Publ. House, 2007. P. 236–240.
- Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Zuikova E. M., Shchegolkov Yu. B., Scott J. C., Stapleton N. R. (2000)* Field Observations of Radar Backscatter Modulation and Radar Doppler Shifts in Slicks // *Proc. 2000 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2000. V. 4. P. 1513–1515.
- Espedal H. A., Johannessen O. M. (2000)* Detection of oil spills near offshore installations using synthetic aperture radar (SAR) // *Intern. J. Remote Sensing*. 2000. V. 21. No. 11. P. 2141–2144.
- Ferraro G., Meyer-Roux S., Muellenhoff O., Pavliha M., Svetak J., Tarchi D., Topouzelis K. (2009)* Long term monitoring of oil spills in European seas // *Intern. J. Remote Sensing*. 2009. V. 30. No. 3. P. 627–645.
- Finni T., Kononen K., Olsonen R., Wallström K. (2001)* The history of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea // *Ambio: J. Human Environment*. 2001. V. 30. No. 4. P. 172–178.
- Finnish Environment Institute (2004) (<http://www.syke.fi/en>)
- Fu L.-L., Holt B. (1982)* Seasat views oceans and sea ice with synthetic-aperture radar: JPL Publication 81-120 / NASA and JET Propulsion Lab. C. I. T. 1982. 200 p.
- Gade M. (2006)* On the imaging of biogenic and anthropogenic surface films on the sea by radar sensors. In *Marine Surface Films: Chemical Characteristics, Influence on Air-Sea Interactions, and Remote Sensing* / eds. M. Gade, H. Hühnerfuss, G. M. Korenowski. Springer, Heidelberg, 2006. P. 189–204.
- Gade M., Seppke B., Dreschler-Fischer L. (2012)* Mesoscale surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite data // *Intern. J. Remote Sens.* 2012. V. 33. Iss. 10. P. 3122–3146.
- Garvin R. W. (1982)* A steady state model for buoyant surface plume hydrodynamics in coastal waters // *Tellus*. 1982. V. 34. P. 293–306.
- Garvin R. W. (1987)* Estuary plumes and fronts in shelf waters: A layer model // *J. Physical Oceanography*. 1987. V. 17. P. 1877–1896.
- Gurova E., Chubarenko B. (2012)* Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // *Oceanologia*. 2012. V. 54. No. 4. P. 631–654.
- Grinevetskiy S. R., Zonn I. S., Zhiltsov S. S., Kosarev A. N., Kostianoy A. G. (2015)* The Black Sea Encyclopedia. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, N. Y., 2015. 889 p.
- Grishin N., Kostianoy A. (2012)* Satellite monitoring of suspended matter pollution resulted from the Nord Stream gas pipeline construction in Russian waters of the Baltic Sea in 2010–2011 // *Intern. Water Technology J.* 2012. V. 2. NO. 1. P. 80–89.
- Hanninen S., Rytönen J. (2004)* Oil transportation and terminal development in the Gulf of Finland: VIT publication N 547. VIT Technical Research Center of Finland, 2004. 141 p.
- Hansson M., Hakansson B. (2007)* The Baltic algae watch system — a remote sensing application for monitoring cyanobacterial blooms in the Baltic sea // *J. Applied Remote Sensing*, 2007. V. 1. No. 1. 011507. 10 p.
- Hällefors G., Niemi Å., Ackefors H., Lassig J., Leppäkoski E. (1981)* Biological oceanography // *The Baltic Sea* / ed. Voipio A. Elsevier Oceanographic Series 30. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1981. P. 219–274.
- Hennings I., Romeiser R., Alpers W., Viola A. (1999)* Radar imaging of Kelvin arms of ship wakes // *Intern. J. Remote Sensing*. 1999. V. 20. No. 13. P. 2519–254.

- Hansson M., Öberg J. (2009)* Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea: HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets. 2009. <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
- Hansson M., Öberg J. (2010)* Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea: HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets. 2010. <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
- Hansson M., Öberg J. (2011)* Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea: HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets. 2011. <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/>.
- HELCOM (2012) http://www.helcom.fi/environment2/biodiv/en_GB/bspas/ (accessed on 1 April 2012).
- HELCOM (2015) Discharges observed during aerial surveillance in the Baltic Sea 2015: Annual report. HELCOM, 2015. 18 p.
- HELCOM (2016a) Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea in 2016. <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/cyanobacterial-blooms-in-the-baltic-sea>.
- HELCOM (2016b) Ecological coherence assessment of the Marine Protected Area network in the Baltic. Balt. Sea Environ. Proc. No. 148. <http://helcom.fi/Lists/Publications/BSEP148.pdf> (accessed on 10 December 2016).
- Hobro R. (1979)* Stages of annual zooplankton succession in the Asko area (Northern Baltic Sea) // Acta Bot. Fennica. 1979. No. 110. P. 79–80.
- Hopkins C. C. E. (2000)* Overview of monitoring in the Baltic Sea: Report to the Global Environment Facility/Baltic Sea Regional Project. AquaMarine Advisers, 2000. 39 p.
- Hovis W. A., Clark D. K., Anderson F., Austin R. W., Wilson W. H., Baker E. T., Ball D., Gordon H. R., Mueller J. L., El-Sayed S., Sturm B., Wrigley R. C., Yentsch C. S. (1980)* NIMBUS-7 Coastal Zone Color Scanner: System description and initial imagery // Science. 1980. V. 210. P. 60–63.
- Hsu M.-K., Liu A. K., Liu C. (2000)* A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR // Cont. Shelf. Res. 2000. V. 20. P. 389–410.
- Ivanov A. Yu., Ginzburg A. I. (2002)* Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Proceedings of the Indian Academy of Sciences // Earth and Planetary Sciences. 2002. V. 111. No. 3. P. 281–295.
- Jackson C. R., Alpers W. (2010)* The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Iss. C9. doi: 10.1029/2009JC006037.
- Johannessen J. A., Digranes G., Espedal H., Johannessen O. M., Samuel P., Browne D., Vachon P. (1994)* SAR ocean feature catalogue. Ser. ESA SP. ESA Publication Division, 1994. 106 p.
- Johansen M. (2010)* Algae report number 13. 2010. <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326>.
- Johansen M., Skjevik A.-T. (2009)* Algae report number 11. 2009. <http://www.smhi.se/en/Publications/algae-report-number-13-2010-1.14326>.
- Judd A., Hovland M. (2007)* Seabed fluid flow: the impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 475 p.
- Kahru M., Elmgren R. (2014)* Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // Biogeosciences. 2014. V. 11. P. 3619–3633.
- Kahru M., Savchuk O. P., Elmgren R. (2007)* Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // Mar. Ecol. Prog. Ser., 2007. V. 343. P. 15–23.
- Karimova S., Gade M. (2016)* Improved statistics of submesoscale eddies in the Baltic Sea retrieved from SAR imagery // Intern. J. Remote Sens. 2016. V. 37. Iss. 10. P. 2394–2414.
- Klaucke I., Sahling H., Bürk D., Weinrebe W., Bohrmann G. (2005)* Mapping deep-water gas emissions with sidescan sonar // EOS (American Geophysical Union Transactions). 2005. V. 86. No. 38. P. 341–346.
- Klaucke I., Sahling H., Weinrebe W. et al. (2006)* Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea // Marine Geology. 2006. V. 231. No. 1–4. P. 51–67.
- Kosarev A. N., Kostianoy A. G. (2005)* Kara-Bogaz-Gol Bay // The Caspian Sea Environment / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Springer, 2005. P. 211–221.

- Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S. (2009) Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution // *Aquatic Geochemistry*. 2009. V. 15. No. 1-2. Special Iss.: Saline Lakes and Global Change. P. 223–236. doi: 10.1007/s10498-008-9054-z.
- Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S., Zhiltsov S. S. (2014) The Caspian Sea and Kara-Bogaz-Gol Bay // *The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan* / eds. Zonn I. S., A. G. Kostianoy. Springer, 2014. V. 28. P. 69–94.
- Kostianoy A. G. (2011) Environmental problems of the Caspian Sea // *Izvestiya National Acad. Sci. of Azerbaijan: Proc. Azerbaijan Acad. Sci, Earth Sciences*. 2011. No. 2. P. 42–55.
- Kostianoy A. G., Kosarev A. N. (2005) The Caspian Sea Environment // *The Handbook of Environmental Chemistry* / ed. O. Hutzinger. V. 5: Water Pollution. Pt. P. / volume eds. Kostianoy A. G., Kosarev A. N. Springer, 2005. 271 p.
- Kostianoy A. G., Kosarev A. N. (2008) The Black Sea Environment // *The Handbook of Environmental Chemistry* / ed. O. Hutzinger. V. 5Q. / volume eds. Kostianoy A. G., Kosarev A. N. Springer, 2008. 457 p.
- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu. (2014) Oil pollution in the Baltic Sea // *The Handbook of Environmental Chemistry* / ed. O. Hutzinger. V. 27 / volume eds. Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu. Springer, 2014. 268 p.
- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Litovchenko K. Ts., Stanichny S. V., Pichuzhkina O. E. (2004a) Satellite remote sensing of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea // *Gayana*. 2004. V. 68. No. 2. P. 327–332.
- Kostianoy A. G., Zavalov P. O., Lebedev S. A. (2004b) What do we know about dead, dying and endangered lakes and seas? // *Dying and Dead Seas* / eds. J. C. J. Nihoul, P. O. Zavalov, Ph. P. Micklin. Dordrecht: NATO ARW/ASI Series, Kluwer Acad. Publ., 2004. P. 1–48.
- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Soloviev D. M., Pichuzhkina O. E. (2005) Satellite monitoring of the Southeastern Baltic Sea: Annual Report-2004. Kaliningrad: Lukoil-Kaliningradmorneft, 2005. 36 p. (= *Костяной А. Г., Лебедев С. А., Соловьев Д. М., Пичужкина О. Е.* Спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря: отчет-2004 / ЛУКОЙЛ. Калининград, 2005. 35 с.)
- Kostianoy A. G., Litovchenko K. Ts., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M., Pichuzhkina O. E. (2006) Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea: 18 months experience // *Environmental Research, Engineering and Management*. 2006. No. 4(38). P. 70–77.
- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Litovchenko K. Ts., Lebedev S. A., Stanichny S. V., Soloviev D. M., Sirota A. M. (2007a) Complex monitoring of oil pollution in the Baltic, Black and Caspian Seas // *Proc. Envisat Symp*. 2007. Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007.
- Kostianoy A., Ambjörn C., Soloviev D. (2007b) Complex satellite monitoring of the Baltic Sea marine protected areas // *Abstr. European Symp. Marine Protected Areas as a Tool for Fisheries, Management and Ecosystem Conservation*. Murcia, Spain, 25–28 Sept. 2007. P. 170.
- Kostianoy A., Ambjörn C., Soloviev D. (2008) Seatrack Web: a numerical tool to protect the Baltic Sea marine protected areas // *Proc. US/EU Baltic 2008 Intern. Symp. "Ocean Observations, Ecosystem-Based Management and Forecasting"*. May 27–29, 2008, Tallinn, Estonia, 2008.
- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Zonn I. S., Lavrova O. Yu., Solovyov D. M. (2011) Satellite Monitoring of Turkmenistan. Moscow: Signal, 2011. 16 p. (= *Костяной А. Г., Лебедев С. А., Зонн И. С., Соловьев Д. М.* Спутниковый мониторинг Туркменистана. М.: Изд-во Сигнал, 2011).
- Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Solovyov D. M. (2014a) Satellite monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysh and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River // *The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan* / eds. Zonn I. S., Kostianoy A. G. Springer, 2014. V. 28. P. 197–232.
- Kostianoy A. G., Ambjörn C., Solovyov D. M. (2014b) Seatrack Web — a Numerical Tool for Environmental Risk Assessment in the Baltic Sea // *Oil Pollution in the Baltic Sea* / eds. A. G. Kostianoy, O. Yu. Lavrova. Springer, 2014. V. 27. P. 185–220.

- Kostianoy A. G., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Solovyov D. M. (2014c)* Satellite monitoring of the Nord Stream gas pipeline construction in the Gulf of Finland // Oil Pollution in the Baltic Sea. V. 27 / eds. A. G. Kostianoy, O. Yu. Lavrova. Springer, 2014. P. 221–248.
- Kostianoy A. G., Bulycheva E. V., Semenov A. V., Krainyukov A. V. (2015)* Satellite monitoring systems for shipping, and offshore oil and gas industry in the Baltic Sea // Transport and Telecommunication. 2015. V. 16. Iss. 2. P. 117–126.
- Kostianoy A. G., Zonn I. S., Kostianaia E. A. (2016)* Geographic Characteristics of the Black-Caspian Seas Region // Oil and gas pipelines in the Black-Caspian Seas Region / eds. S. S. Zhiltsov, I. S. Zonn, A. G. Kostianoy. Springer, 2016. P. 7–36. doi: 10.1007/698_2016_462.
- Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Kopelevich O. V., Kudryavtsev V. N., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mitnik L. M., Mityagina M. I., Smirnov V. G., Stanichny S. V., Troitskaya Yu. I. (2017)* Ocean Remote Sensing in Russia // Comprehensive Remote Sensing. 2017. V. 8. Ocean Remote Sensing. Elsevier, 2017.
- Kouraev A. V., Cretaux J.-F., Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., Mamedov R., Zakharova E. A., Roblou L., Lyard F., Calmant S., Berge-Nguyen M. (2011)* Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea // Coastal Altimetry / eds. S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipolini, J. Benveniste. Springer, 2011. P. 331–366. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_13.
- Kowalik Z. (1990)* Currents // The Gulf of Gdańsk / ed. Majewski A. Wyd. Geol., Wrocław. 1990. P. 140–153.
- Kuhrts C., Fennel W., Seifert T. (2004)* Model studies of transport of sedimentary material in the western Baltic // J. Marine Systems. 2004. V. 52. P. 167–190.
- Kuronen J., Helminen R., Lehtikoinen A., Tapaninen U. (2008)* Maritime transportation in the Gulf of Finland in 2007 and in 2015 / Centre for Maritime Studies, University of Turku. 2008. N. A-45. 114 p.
- Larsson U., Elmgren R., Wulff F. (1985)* Eutrophication and the Baltic Sea: causes and consequences // *Ambio*. 1985. V. 14. Iss. 1. P. 9–14.
- Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu. (2006)* Satellite SAR observations of atmospheric and oceanic vortex structures in the Black Sea coastal zone // *Advance in Space Research*. 2006. V. 38. No. 10. P. 2162–2168.
- Lavrova O., Bocharova T., Kostianoy A. (2006a)* Satellite radar imagery of the coastal zone: slicks and oil spills // *Global Developments in Environmental Earth Observation from Space* / ed. A. Marcal. Rotterdam, Netherlands: Millpress Science Publishers, 2006. P. 763–771.
- Lavrova O. Yu., Bocharova T. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoy A. G. (2006b)* An approach to operational oil pollution monitoring in coastal zones // *Advances in SAR Oceanography from Envisat and ERS Missions*. SEASAR-2006, 23–26 Jan. 2006, Frascati, Roma, Italy.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Gade M. (2008a)* Multi-Sensor Observations of Meso-Scale Features in European Coastal Waters // *Remote sensing of the European Seas*. Springer, 2008. P. 463–474.
- Lavrova O., Mityagina M., Bocharova T., Kostianoy A., Krovotyntsev V. (2008b)* Multisensor approach to operational oil pollution monitoring in coastal zones // *Proc. IGARSS-2008*. 6–11 July 2008.
- Lavrova O., Karimova S., Mityagina M. (2010)* Eddy Activity in the Baltic Sea Retrieved from Satellite SAR and Optical Data // *Proc. 3rd Intern. Workshop SeaSAR-2010*. Ed. ESA. 2010. V. ESA-SP-679. 5 p.
- Lavrova O., Bocharova T., Mityagina M. (2011)* Satellite monitoring of the oil spill in the Kerch Strait // *Oil spill accident in the Kerch Strait in November 2007* / eds. AA. Korshenko, Yu. Ilyin, V. Velikova. Black Sea Commission Publications. Moscow: Nauka, 2011. 288 p.
- Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T. (2013)* Investigation of small scale hydrodynamic processes using high resolution SAR imagery and ADCP data // *ESA Living Planet Symp.: Proc. conf. held on 9–13 Sept. 2013*. Edinburgh in United Kingdom. ESA SP-722. 2-13. P. 69.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu. (2014a)* Manifestation of ship wakes in satellite images in periods of intense algae bloom // *Proc. of IEEE/OES Baltic Symp. 2014: Measuring*

- and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment. Tallinn, 2014. 6 p. doi: 10.1109/BALTIC.2014.6887872.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Semenov A. V. (2014b) Oil pollution in the southeastern Baltic Sea in 2009–2011 // Transport and Telecommunication. 2014. V. 15. No. 4. P. 322–331.
- Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu. (2015) Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2015 / eds. Ch. R. Bostater, St.P. Mertikas, X. Neyt; Proc. SPIE 2015. V. 9638. doi: 10.1117/12.2193905.
- Lavrova O.; Krayushkin E.; Golenko M.; Golenko N. (2016a) Effect of Wind and Hydrographic Conditions on the Transport of Vistula Lagoon Waters Into the Baltic Sea: Results of a Combined Experiment // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. Iss. 9. doi: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
- Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strochkov M. A., Bocharova T. Yu., Kashnitsky A. V. (2016b) River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // SPIE 9999, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016, 99990G. Oct. 19, 2016. doi:10.1117/12.2241312.
- Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Bocharova T. Yu., Kostianoy A. G. (2016c) Determining zones of persistent ecological risk in the Baltic Sea // Abstr. Book Living Planet Symp. 2016. 9–13 May, 2016, Prague, Czech Republic, OCEA-89.
- Lebedev S. A., Kostianoy A. G. (2008) Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorological, hydrologic and hydrodynamic regime of the Caspian Sea // Terr. Atmos. Ocean. Sci. 2008. V. 19. No. 1–2. P. 71–82. doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.116(SA).
- Lina Cai L., Tang D., Li X., Zheng H., Shao W. (2015) Remote sensing of spatial-temporal distribution of suspended sediment and analysis of related environmental factors in Hangzhou Bay, China // Remote Sensing Letters. 2015. V. 6. No. 8. P. 597–603.
- Lindén O., Chircop A., Pourzanjani M., Schröder J.-U., Raaymakers S. (2006) PSSA in the Baltic Sea: Present situation and future possibilities. World Maritime University, Malmö, Sweden, 2006, 28 p.
- Lu J. (2003) Marine oil spill detection, statistics and mapping with ERS SAR imagery in south-east Asia // Intern. J. Remote Sensing, 2003. V. 24. Iss. 15. P. 3013–3032.
- MacDonald I. R., Leifer I., Sassen R., Stine P., Mitchell R., Guinasso N. (2002). Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere // Geofluids. 2002. V. 2. No. 2. P. 95–107.
- Manual on Harmful Marine Microalgae (1995) / eds. Hallegraeff G. M., Anderson D. M., Cembel-la A. D. 1995. V. 33. UNESCO, 1995. 23 p.
- MARIS (2004). Maritime Accident Response Information System // MARIS. Baltic Marine Environment Protection Commission (HELCOM) (www.helcom.fi/maris.html).
- Marmorino G. O., Holt B., Molemaker M. J., DiGiacomo P. M., Sletten M. A. (2010) Airborne synthetic aperture radar observations of “spiral eddy” slick patterns in the Southern California Bight // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. No. C05010. doi: 10.1029/2009JC005863.
- Mityagina M., Churumov A. (2006) Radar backscattering at sea surface covered with oil films // Global Developments in Environmental Earth Observation from Space / ed. A. Marcal. Rotterdam, Netherlands: Millpress, 2006. P. 783–790.
- Mityagina M. I., Lavrova O. Yu. (2012) Satellite survey in the Black Sea coastal zone // Intern. Water Technology J. 2012. V. 2. Iss. 1. P. 67–79.
- Mityagina M. I., Lavrova O. Yu. (2014) Radar manifestations of ship wakes in algae bloom zones // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2014. doi: 10.1117/12.2067339.
- Mityagina M., Lavrova O. (2015a) Satellite monitoring of the Black Sea surface pollution // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). Milan, Italy, 26–31 July 2015. P. 2291–2294, doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326265.

- Mityagina M. I., Lavrova O. Yu. (2015b)*. Multi-Sensor Satellite Survey of the Surface Oil Pollution in the Caspian Sea // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2015 / ed. Ch. R. Bostater, St. P. Mertikas, X. Neyt.
- Mityagina M., Lavrova O. (2016)* Satellite Survey of Inner Seas: Oil Pollution in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2016. V. 8. P. 875. doi: 10.3390/rs8100875.
- Mityagina M. I., Lavrova O. Y., Karimova S. S. (2010)* Multi-sensor survey of seasonal variability in coastal eddy and internal wave signatures in the north-eastern Black Sea // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 31. No. 17. P. 4779–4790.
- Munk W., Armi L., Fischer K., Zachariasen F. (2000)* Spirals on the sea // Proc. Royal Society. London. A. 2000. V. 456. P. 1217–1280.
- Naehr T. H., MacDonald I. R. (2010)*. Remote Sensing and Sea-Truth Measurements of Methane Flux to the Atmosphere (HYFLUX project): Quarterly Progress Report. July 2010 – September 2010, Texas A&M University-Corpus Christi, DOE Award No.: DE-NT0005638. Department of Energy/National Energy Technology Laboratory.
- Nazirova K., Lavrova O., Mityagina M., Krayushkin E. (2015)* Influence of vortex structures on the spread of pollution // Proc. 12th Intern. Conf. Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST 2015. 6–10 Oct. 2015, Varna, Bulgaria / ed. E. Ozhar. 2015. V. 2. P. 985–996.
- Neteler M., Bowman M. H., Landa M., Metz M. (2012)*. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS // Environmental Modelling and Software. 2012. V. 31. P. 124–130.
- Öberg, J. (2016)* Cyanobacteria blooms in the Baltic Sea // HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets 2016. URL: <http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/eutrophication/cyanobacterial-blooms-in-the-baltic-sea/>
- Oceana (2003) The other side of oil slick. The dumping of hydrocarbons from ships into the seas and oceans of Europe. 31 p. URL: <http://oceana.org/north-america/publications/reports>.
- Oceana (2004) The EU fleet and chronic hydrocarbon contamination of the oceans. 58 p. URL: <http://oceana.org/north-america/publications/reports>.
- OCEANIDES Project (2003–2005). URL: <http://oceanides.jrc.cec.eu.int/>.
- Offshore pipeline through the Baltic Sea (2007). Memo 4.3A-5. Spreading of sediment and contaminants during works in the seabed. Ramboll. November 2007.
- Oil pollution in the North Sea: The Handbook of Environmental Chemistry (2016) / ed. Carpenter A. Springer, 2016. V. 41. 312 p.
- Oil pollution in the Mediterranean Sea. Pt. 1. The international context: The Handbook of Environmental Chemistry (2017a) / eds. Carpenter A., Kostianoy A. G. Springer, 2017.
- Oil pollution in the Mediterranean Sea. Pt. 2. National case studies: The Handbook of Environmental Chemistry. (2017b) / eds. Carpenter A., Kostianoy A. G. Springer, 2017.
- Osadchiev A. A., Zavialov P. O. (2013)* Lagrangian model of a surface-advected river plume // Continental Shelf Research. 2013. V. 58. P. 96–106.
- Osinski R., Pak D., Walczowski W., Piechura J. (2010)* Baroclinic radius of deformation in the southern Baltic Sea // Oceanologia. 2010. V. 52. No. 3. P. 417–429.
- Ou S., Zhang H., Wang D. (2009)* Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River estuary in summer // Environmental Fluid Mechanics. 2009. V. 9. No. 5. P. 471–492.
- Overall Environmental and Social Monitoring Programme (2010). Nord Stream Project. October 2010, Document No. G-PE-EMS-MON-100-08010000. 188 pp. <http://www.nord-stream.com/ru/ekologiya/monitoring-okruzhayushchei-sredy/>.
- Paerl H. W., Huisman J. (2009)* Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms // Environmental Microbiology Reports, 2009. V. 1. P. 27–37. doi: 10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x
- Peperzak L. (2003)* Climate change and harmful algal blooms in the North Sea // Acta Oecologica. 2003. V. 24. P. S139-S144.

- Pichel W.G., Clemente-Colón P., Wackerman C.C., Friedman K.S. (2004) Ship and wake detection // Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual / ed. C.R. Jackson, J.R. Apel. 2004. P. 277–304.
- Pruszek Z., van Ninh P., Szymkiewicz M., Ostrowski R. (2005) Hydrology and morphology of two river mouth regions (temperate Vistula Delta and subtropical Red River Delta) // *Oceanologia*. 2005. V. 47. No. 3. P. 365–385.
- Redondo J.M., Platonov A., Tarquis A. (2008) Detection and prediction from SAR multiscale analysis. SeaSAR 2008 // The 2nd Intern. Workshop on advances in SAR oceanography from Envisat and ERS missions. 21–25 Jan. 2008, Rome, Italy.
- Reed A.M., Milgram J.H. (2002) Ship wakes and their radar images // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2002. V. 34. P. 469–502.
- Reinart A., Kutser T. (2006) Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea // *Remote Sensing of Environment*. 2006. V. 102. No. 1-2. P. 74–85.
- Robakiewicz M. (2009) Hydrodynamics in the Gulf of Gdańsk (part II). MACHU Fin. Rep., 3, Rotterdam, 2009. P. 75–79.
- Rogalus M.K., Watzin M.C. (2008) Evaluation of sampling and screening techniques for tiered monitoring of toxic cyanobacteria in lakes // *Harmful Algae*. 2008. V. 7. No. 4. P. 504–514.
- Ronnberg C., Donsdorff E. (2004) Baltic Sea eutrophication: are-specific ecological consequences // 17th BMB Symp. / eds. Kautsky H., Snoijs P. Stockholm: Kluwer, 2004. P. 371–378.
- Rud O., Gade M. (1999) Monitoring algae blooms in the Baltic Sea: A multi-sensor approach // *Proc. IGARSS'99*. 28 June – 2 July 1999, Hamburg, Germany. 1999. V. 2. P. 1211–1213.
- Scully-Power P. (1986) Navy Oceanographer Shuttle Observations, STS 41-G: Mission Report. Naval Underwater Systems Center Tech. Rep. NUSC TD 7611, 1986. 71 pp.
- Seppke B., Gade M., Dreschler-Fischer L. (2010a) Evaluation of high-resolution sea surface current fields in the Baltic Sea derived from multi-sensor satellite imagery // *Proc. ESA Living Planet Symp.* 2010.
- Seppke B., Gade M., Dreschler-Fischer L. (2010b) The use of spatial constraints in the derivation of mesoscale sea surface current fields from multi-sensor satellite data // *Proc. 2010 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2010)*. 2010. P. 2226–2229.
- Shcherbak S.S., Lavrova O.Y., Mityagina M.I., Bocharova T.Y., Krovotyntsev V.A., Ostrovskii A.G. (2008). Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the northeastern coastal zone of the Black Sea // *Intern. J. Remote Sensing*. 2008. V. 29. No. 21. P. 6331–6345.
- Shi L., Ivanov A. Yu., He M.-X., Zhao C. (2008) Oil spill mapping in the western part of the East China Sea using synthetic aperture radar imagery // *Intern. J. Remote Sensing*. 2008. V. 29. No. 21. P. 6315–6329.
- Skjevik A.-T. (2011) Algae report number 10. 2011. URL: <http://www.smhi.se/en/publications/algae-report-number-10-2011-1.19360>.
- Soloviev A., Gilman M., Young K., Bruschi S., Lehner S. (2010) Sonar measurements in ship wakes simultaneous with TerraSAR-X overpasses // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2010. V. 48. P. 841–851.
- Stevenson R.E. (1989) *Oceanography from the Space Shuttle / USA*, Office of Naval Research, The University Corporation for Atmospheric Research. 1989. 200 p.
- Stevenson R.E. (1998) Spiral eddies: the discovery that changed the face of the oceans // *21st Century Sci. Technol.* 1998. V. 11. P. 58–71.
- Teodoro A., Almeida H. (2011) Spatio-temporal variability analysis of the Douro river plume through MERIS data for one hydrological year // *Proc. SPIE 8174. Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIII*, 81741N. Oct. 7, 2011. doi: 10.1117/12.897519.
- The Gulf of Gdańsk (1990) / Ed. Majewski A. Wrocław: Wyd. Geol., 1990. 502 p. (in Polish)
- Topouzelis K., Bernardini A., Ferraro G., Meier-Roux S., Tarchi D. (2006) Satellite mapping of oil spills in the Mediterranean Sea // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2006. V. 15. No. 9A. P. 1009–1014.

- Urbanski J. A., Grusza G., Chlebus N., Kryla L. (2008)* A GIS-based WFD oriented typology of shallow micro-tidal soft bottom using wave exposure and turbidity mapping // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2008. V. 78. P. 27–37.
- Varushchenko A. N., Lukyanova S. A., Solovieva G. D., Kosarev A. N., Kurayev A. V. (2000)* Evolution of the Gulf of Kara-Bogaz-Gol in the past century // *Dynamics Earth Environments. Remote Sensing Observations from Shuttle-Mir Missions* / eds. K. P. Lulla, L. V. Dessinov. John Wiley and Sons, Inc., 2000. P. 201–210.
- Wagner-Friedrichs M. (2007)* Seafloor seepage in the Black Sea: Mud volcanoes, seeps and diapiric structures imaged by acoustic methods: Dissertation thesis. University Bremen, Bremen, 154 p. <http://elib.suub.uni-bremen.de/diss/docs/00010674.pdf>.
- Whitney M., Garvine R. (2005)* Wind influence on a coastal buoyant outflow // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. C03014. doi: 10.1029/2003JC002261.
- World Database on Marine Protected Areas (MPAs) (<http://www.wdpa-marine.org/#/countries/about>) and MPA Global (<http://mpaglobal.org/index.php?action=search>) (accessed on 1 April 2012).
- Zajaczkowski M., Darecki M., Szczuciński W. (2010)* Report on the development of the Vistula river plume in the coastal waters of the Gulf of Gdansk during the May 2010 flood // *Oceanologia*. 2010. V. 52. No. 2. P. 311–317.
- Zeng K., Alpers W. (2004)* Generation of internal solitary waves in the Sulu Sea and their refraction by bottom topography studied by ERS SAR imagery and a numerical model // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. No. 7-8. P. 1277–1281.
- Zhiltsov S. S., Zonn I. S., Kostianoy A. G. (Eds.) (2016)* Oil and gas pipelines in the Black-Caspian Seas Region. Springer, 2016. 288 p. doi 10.1007/978-3-319-43908-2.
- Zilman G., Zapolski A., Marom M. (2004)* The speed and beam of a ship from its wake's SAR images // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. P. 2335–2343.
- Zonn I. S. (2005)* Environmental issues of the Caspian // *The Caspian Sea Environment* / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev: The Handbook of Environmental Chemistry. V. 5: Water Pollution. Pt. 5P. Springer, 2005. P. 223–242.
- Zonn I. S., Kostianoy A. G. (2016a)* Environmental risks in production and transportation of hydrocarbons in the Caspian-Black Sea Region // *Oil and gas pipelines in the Black-Caspian Seas Region* / eds. S. S. Zhiltsov, I. S. Zonn, A. G. Kostianoy. Springer, 2016. P. 211–224. doi: 10.1007/698_2015_419.
- Zonn I. S., Kostianoy A. G. (2016b)* The Caspian Sea Basin // *Handbook of Applied Hydrology* / ed. V. P. Singh. 2nd Ed. McGraw-Hill Education, 2016. Ch. 124. P. 124-1–124-7.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БС	Балтийская система
БТС	Балтийская трубопроводная система
ВВ	взвешенные вещества
ВВ	вертикальная поляризация
ВГ и ГВ	перекрестные поляризации
ВОЗ	Всемирная организация здравоохранения
ГГ	горизонтальная поляризация
ГМССБ	глобальная морская система спасения и бедствия
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ЕКА	Европейское космическое агентство (European Space Agency, ESA)
ЕМФ	единица мутности по формазину
ЗВ	загрязняющие вещества водной среды
ИБДСА	Интегрированная база данных спутниковой альтиметрии
ИК	инфракрасный
ИКИ РАН	Институт космических исследований РАН
ИО РАН	Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
ИПФ РАН	Институт прикладной физики РАН
ИСЗ	искусственный спутник Земли
ИТЦ	инженерно-технический центр
ИЭЗ	исключительная экономическая зона
КА	космический аппарат
КЗС	комплекс защитных сооружений
КНТ	комплексный нефтяной терминал
КТК	Каспийский трубопроводный консорциум
МАРПОЛ 73/78	Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78)
МГИ РАН	Морской гидрофизический институт РАН
МКС	Международная космическая станция
МЛСП	морская ледостойкая стационарная платформа
ММПК	многофункциональный морской перегрузочный комплекс
МОР	морской охраняемый район
МПК	морской перегрузочный комплекс
МЧС РФ	Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

НИС	научно-исследовательское судно
НИЦ	научно-исследовательский центр
НМТП	Новороссийский морской торговый порт
НП	нефтепродукты
НПЗ	нефтеперерабатывающий завод
НСП	нефтесборный пункт
НУ	нефтяные углеводороды
ОВОС	оценка воздействия на окружающую среду
ООН	Организация Объединённых Наций
ОПЕК	Организация стран — экспортёров нефти
ОУМР	особо уязвимый морской район
ОЧТ	основное черноморское течение
ПАВ	прибрежный антициклонический вихрь
ПАЗ	зона прибрежной антициклонической завихренности течений
ПДК	предельно допустимая концентрация
ПНХ	плавучее нефтехранилище
РАН	Российская академия наук
РЛ	радиолокация
РЛИ	радиолокационное изображение
РЛС	радиолокационная станция
РНФ	Российский научный фонд
Росгидромет	Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России
РПК	Распределительно-погрузочный комплекс
РСА	радиолокатор с синтезированной апертурой
СВЧ	сверхвысокочастотное излучение
СЕГ	Северо-Европейский газопровод
СПБУ	самоподъёмная плавучая буровая установка
СТМ	сейнер-траулер морозильный
СУДС	система управления движения судов
ТМ	тяжёлые металлы
ТП	точечный причал
УФ	ультрафиолет
ФАР	фотоактивная радиация
ХОВ	химические отравляющие вещества
ХОС	хлорорганические фосфорсодержащие соединения
ЦЗ	центральная зона циклонической завихренности течений
ЮНЕСКО	Организация объединённых наций по вопросам образования, науки и культуры (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)
AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometer (усовершенствованный сканирующий вдоль трека пассивный радиометр ИК- и СВЧ-диапазонов)
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler (акустический доплеровский профилограф течений)

AIRS	Atmospheric Infrared Sounder (прибор, измеряющий температуру и влажность атмосферы, температуру суши и морской поверхности)
AIS	Automatic Identification System (система автоматической идентификации судов)
ALI	Advanced Land Imager (усовершенствованный прибор для изучения суши)
AMI	Active Microwave Instrument (активный микроволновый сенсор)
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer (усовершенствованный микроволновой сканирующий радиометр)
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A (многоканальный СВЧ-радиометр)
APM	Associated Protective Measures (соответствующие защитные меры)
APP	Alternating Polarisation Precision Image (изображения, получаемые в узкой полосе обзора с разрешением в точке 12,5 м на альтернативной поляризации)
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar (усовершенствованный радиолокатор с синтезированной апертурой)
ASI	Agenzia Spaziale Italiana (Итальянское космическое агентство)
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (усовершенствованный термально-оптический радиометр)
ATSR	Along Track Scanning Radiometer (сканирующий вдоль трека пассивный радиометр ИК- и СВЧ-диапазонов)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения)
BSH	Federal Maritime and Hydrological Agency, Hamburg, Germany (Федеральное морское и гидрологическое агентство, Гамбург, Германия)
BSPA	The Baltic Sea Protected Areas (охраняемые районы Балтийского моря)
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System (система изучения облачности и излучения Земли)
Chl-a	<i>Chlorophyll-a</i> Concentration (концентрация хлорофилла-а)
CSA	Canadian Space Agency (Канадское космическое агентство)
CTD	Instrument used to determine the conductivity, temperature, and depth of the ocean (прибор для измерения проводимости, температуры и глубины океана)
CZCS	Coastal Zone Color Scanner (сканер цвета для изучения прибрежных зон)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (German Aerospace Center, Немецкое космическое агентство)
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (система доплеровского слежения)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, Великобритания)

EMSA	European Maritime Safety Agency (Европейское агентство по морской безопасности)
Envisat	Environment Satellite (спутник по исследованию окружающей среды)
ERS	European Remote Sensing Satellite (серия европейских спутников дистанционного зондирования)
ESA	European Space Agency (Европейское космическое агентство, ЕКА)
EOS	Earth Observing System (Система наблюдения Земли)
FOTS	Floating Objects Tracking System
FNU	Formazine Nephelometric Unit (единица измерения мутности)
FCA	The areal fraction with cyanobacteria accumulations
FTU	Formazine Turbidity Unit (единицы мутности по формазину)
GMES	Global Monitoring for Environment and Security (Международная программа «Глобальный мониторинг в интересах охраны окружающей среды и безопасности»)
GMT	Greenwich Mean Time (среднее время по Гринвичу)
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment (прибор для изучения озонового слоя)
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (спектрометр, предназначен для восстановления профиля содержания озона в стратосфере)
GPS	Global Positioning System (глобальная система позиционирования)
GSM	Global System for Mobile Communications (глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи)
HELCOM	Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission
HICO	Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (гиперспектрометр высокого разрешения для наблюдения и изучения прибрежных зон морей и океанов)
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model (модель высокого разрешения по ограниченному пространству)
HIROMB	High Resolution Operational Model for the Baltic Sea (оперативная модель высокого разрешения для Балтийского моря)
HSB	Humidity Sounder for Brazil (четырёхканальный микроволновой прибор, разработанный бразильскими специалистами для определения влажности в атмосфере)
IBA	Important Bird Areas (ключевые орнитологические территории)
IMO	International Maritime Organization (Международная морская организация)
IMP	Image Mode Precision Image (изображения, получаемые в узкой полосе обзора с разрешением в точке 12,5 м)
KSAT	Kongsberg Satellite Services (Конгсбергские спутниковые службы, Тромсё, Норвегия)
MDA	MacDonald Dettwiler Associates Ltd. of Richmond, BC

MERRA	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer (спектрометр среднего разрешения)
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (фурье-спектрометр среднего инфракрасного диапазона для изучения атмосферы)
MISR	Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (многоугловой сканирующий спектрорадиометр)
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения)
MOPITT	Measurements of Pollutioning the Troposphere (четырёхканальный корреляционный спектрометр, предназначенный для измерения загрязнения в тропосфере)
MSI	Multi-Spectral Instrument (оптико-электронный мультиспектральный сенсор)
MSS	Multispectral Scanner (мультиспектральный сканер)
MWR	Microwave Radiometer (СВЧ-радиометр)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства, США)
NCAR	The National Center for Atmospheric Research (Национальный центр атмосферных исследований, США)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction (Национальные центры предсказания окружающей среды)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальный комитет по исследованию океана и атмосферы, США)
NPP	National Polar-orbiting Partnership (Национальное полярно-орбитальное партнерство — американский метеорологический спутник, управляемый NOAA)
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (единица мутности)
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument (сканер цвета для изучения океана и суши)
OLI/TIRS	Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor
PRARE	Precise Range And Range — Rate Equipment (высокоточный радиодальномер, обеспечивающий точные траекторные измерения)
RA	Radar Altimeter (радар-альтиметр)
Radarsat	Radar Satellite (спутник с радиолокатором на борту)
RDANH	Royal Danish Administration of Navigation and Hydrography (Королевская Датская администрация судоходства и гидрографии)
SAR	Synthetic Aperture Radar (радиолокатор с синтезированной апертурой)
SCIAMACHY	Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (спектрометр, измеряющий спектры проходящего, рассеянного и отражённого в атмосфере солнечного излучения)

SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (широкополосный датчик обзора морской поверхности)
SeaSat	Sea Satellite (морской спутник, искусственный спутник Земли, предназначенный для дистанционного зондирования океана и имеющий на борту первый радиолокатор с синтезированной апертурой)
SLC	Scan Line Corrector (прибор коррекции продольного движения спутника)
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer (радиометр, предназначенный для измерения температуры поверхности моря и суши)
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (Шведский институт метеорологии и гидрологии)
SRAL	Synthetic Aperture Radar Altimeter (радар-альтиметр с синтезированной апертурой)
SST	Sea Surface Temperature (температура поверхности моря)
STS	Геопортал "See The Sea", разработанный в ИКИ РАН
SWIR	Short-wavelength infrared (коротковолновая инфракрасная зона спектра)
SYKE	Finnish Environment Institute (Финский институт окружающей среды)
TEU	Twenty-foot equivalent unit (эквивалент двадцатифунтового контейнера)
TIRS	Thermal Infrared Sensor (сенсор инфракрасного диапазона)
TRACECA	Transport Corridor Europe-Caucasus-Asia (транспортный коридор «Европа-Кавказ-Азия»)
TSM	Total Suspended Matter (концентрация общего взвешенного вещества)
U.S.EPA	Агентство по охране окружающей среды США
USGS	United States Geological Survey (Геологическая служба США)
UTC	Universal Time Coordinated (всемирное координированное время)
VNIR	Visible and near-infrared (ближняя инфракрасная зона спектра)
WLR	Water Leaving Radiance (восходящее из воды излучение)

055(02)2

ИКИ РАН
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 6.12.2016

Заказ 4159

Формат 70×100/16

Тираж 200

27,3 усл.-печ. л.