



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

# **СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ**

**МОСКВА  
2022**

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 исследования изменчивости Каспийского моря. М.: ИКИ РАН, 2022. 250 с. : табл., ил., цв. ил.

ISBN 978-5-00015-058-0

Монография посвящена исследованию изменения экологического состояния Каспийского моря на протяжении текущего столетия под воздействием природных и антропогенных факторов с помощью спутниковых данных и средств дистанционного зондирования Земли. Представленные материалы базируются на результатах, полученных в ходе выполнения проекта Российского научного фонда (РНФ) № 19-77-20060 «Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования», который выполнялся в 2019–2022 гг. Данные исследования проводились объединённой командой учёных из Института космических исследований РАН (Москва) и Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва). 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 морской 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 Каспийского моря. Полученные результаты будут также интересны лицам, принимающим решения, особенно в свете развития евразийских транспортных коридоров на Каспии. 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 in the study of the Caspian Sea variability

The monograph is devoted to the study of changes in the ecological state of the Caspian Sea over the course of the current century under the influence of natural and anthropogenic factors using satellite data and remote sensing of the Earth from space. The presented materials are based on the results obtained during the implementation of the project of the Russian Science Foundation (RSF) No. 19-77-20060 “Assessing ecological variability of the Caspian Sea in the current century using satellite remote sensing data” carried out in 2019–2022. These studies were performed by a team of scientists from the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow) and Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (Moscow). The book discusses the purpose and objectives of the research, state of the art, 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 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 offshore 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 in the Caspian Sea. The results obtained will also be of interest to decision makers, especially in light of the development of the Eurasian transport corridors in the Caspian. The book contains a lot of illustrations and an extensive list of references on various aspects of remote sensing of the Earth from space.

***Монография подготовлена и издана при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-77-20060 «Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования».***

Компьютерная верстка: Комарова Н. Ю.  
Дизайн обложки: Кобец Д. А., Захаров А. Н.

ISBN 978-5-00015-058-0

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
Литература .....	12
<b>ГЛАВА 1</b>	
<b>ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ</b> .....	13
Литература .....	28
<b>ГЛАВА 2</b>	
<b>СРЕДСТВА И МЕТОДЫ РАБОТЫ С ДАННЫМИ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b> .....	31
2.1. Спутниковые данные .....	31
2.1.1. Исследования океана из космоса в видимом диапазоне спектра .....	32
2.1.2. Исследования океана из космоса в тепловом инфракрасном диапазоне спектра .....	39
2.1.3. Спутниковая радиолокация морской поверхности .....	40
2.1.4. Спутниковая альтиметрия .....	45
2.2. Спутниковые сенсоры .....	47
2.3. Искусственные спутники Земли .....	48
2.3.1. Спутники серии Sentinel .....	48
2.3.1. Спутники серии Landsat .....	51
2.4. Спутниковый информационный сервис See the Sea .....	51
2.4.1. Особенности построения системы See the Sea .....	53
2.4.2. Основные данные входящие в систему See the Sea .....	53
2.4.3. Возможности работы с данными .....	55
2.4.4. Перспективы развития .....	58
Литература .....	59
<b>ГЛАВА 3</b>	
<b>НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ</b> .....	62
3.1. Район нефтедобычи Нефтяные Камни .....	69
3.2. Выходы естественных углеводородов со дна Каспийского моря в районе иранского и туркменского шельфов .....	84
3.3. Загрязнение морской поверхности Южного Каспия, обусловленное грязевым вулканизмом .....	99
3.4. Нефтяное загрязнение морской поверхности, обусловленное нефтесодержащими судовыми сбросами .....	105
3.5. Оценка вкладов различных типов загрязнений, выявленных по спутниковым данным, в интегральное нефтяное загрязнение поверхности Каспийского моря .....	109
Литература .....	110
<b>ГЛАВА 4</b>	
<b>МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В СЕВЕРНОМ КАСПИИ</b> .....	115
Введение .....	115
4.1. Используемые данные .....	118
4.2. Сумма градусо-дней мороза .....	124
4.3. Суровость зимы .....	126

4.4. Продолжительность ледяного покрова .....	131
4.5. Максимальная годовая площадь ледяного покрова .....	135
Выводы .....	139
Литература .....	141
<b>ГЛАВА 5</b>	
<b>ЦВЕТЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА .....</b>	<b>144</b>
5.1. Сезонная и межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла <i>a</i> .....	146
5.2. Сезонная изменчивость и пространственное распределение концентрации хлорофилла <i>a</i> в 2022 г. ....	150
5.3. Аномально интенсивное цветение фитопланктона в Южном Каспии .....	153
Литература .....	167
<b>ГЛАВА 6</b>	
<b>КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ .....</b>	<b>169</b>
6.1. Температура воздуха .....	169
6.2. Температура поверхности моря .....	172
6.2.1. Тренды температуры поверхности моря в районах Каспия и заливе Кара-Богаз-Гол в период с июля 2002 г. по ноябрь 2022 г. ....	173
6.2.2. Гистограммы распределения ТПМ в Каспийском море за 2003, 2010 гг. и за период с июля 2002 г. по ноябрь 2022 г. ....	176
6.2.3. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности моря .....	176
6.3. Осадки .....	185
6.4. Облачность .....	186
6.5. Скорость ветра .....	187
6.6. Влажность .....	189
6.7. Уровень моря .....	190
Литература .....	192
<b>ГЛАВА 7</b>	
<b>ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ .....</b>	<b>195</b>
7.1. Сгонно-нагонные явления .....	195
7.1.1. Данные и методы .....	197
7.1.2. Сгонно-нагонные явления в 2019 г. ....	199
7.1.3. Сгонно-нагонные явления в 2020 г. ....	202
7.2. Исследование выносов рек Терек и Сулак дистанционными и контактными методами .....	208
7.2.1. Физико-географические характеристики рек Терек и Сулак .....	209
7.2.2. Данные и методы .....	210
7.2.3. Зависимость между мутностью воды и концентрацией взвеси, определёнными по данным натурных измерений .....	214
7.2.4. Сравнение результатов измерения мутности воды по данным спутникового зондирования и подспутниковых измерений .....	217
7.2.5. Качественный и количественный минеральный состав взвеси в пробах воды рек Терек и Сулак .....	219
7.3. Вихревые процессы .....	222
7.3.1. Пространственно-временная изменчивость проявлений вихревых процессов на радиолокационных изображениях .....	223
7.3.2. Пространственно-временная изменчивость проявлений вихревых процессов на спутниковых изображениях оптического диапазона .....	227
Литература .....	232
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>238</b>
Литература .....	245
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>247</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Состояние экосистем Каспийского моря и его побережья вызывает серьёзную тревогу, обусловленную не только антропогенными, но и природными причинами (климатическими изменениями, экстремальными метеорологическими и гидрологическими явлениями, опасными природными явлениями, а также частотой их повторения и т.д.). В связи с этим возникает необходимость комплексного анализа как антропогенных факторов (нефтяное загрязнение), так и климатических изменений и всех явлений, связанных с ними (падение уровня Каспия, региональное потепление климата, уменьшение ледяного покрова, цветение вод и пр.). Информация об этих процессах и явлениях может быть получена с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса — спутниковой спектрорадиометрии, радиолокации, альтиметрии, скатерометрии и других дистанционных методов.

В 2019–2022 гг. в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) выполнялся проект Российского научного фонда (РНФ) № 19-77-20060 «Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования». Главная задача проекта состояла в оценке изменения экологического состояния Каспийского моря на протяжении текущего столетия под воздействием природных и антропогенных факторов с помощью спутниковых данных и средств дистанционного зондирования Земли. Первостепенной экологической проблемой Каспийского моря на протяжении многих лет выступает нефтяное загрязнение, которое связано как с добычей нефти и её транспортировкой, так и с изменением уровня моря, приводящим к вторичному загрязнению, стоком рек и даже с сейсмической активностью, которая провоцирует естественные сипажи нефти со дна моря. Этот проект позволил оценить относительный вклад каждого из источников нефтяного загрязнения Каспийского моря, который меняется в различные периоды времени в зависимости от климатических факторов, интенсивности различных гидродинамических и гидрометеорологических процессов, сейсмической активности и хозяйственной деятельности человека. Кроме того, результаты проекта позволяют оценить пространственно-временную изменчивость нефтяного загрязнения на всей акватории Каспийского моря, что особенно важно и актуально после подписания Конвенции о правовом статусе Каспийского моря в августе 2018 г.

Актуальность оценки изменения экологического состояния Каспийского моря на протяжении текущего столетия под воздействием природных и антропогенных факторов заключается в том, что подписав Конвенцию о правовом статусе Каспийского моря, прикаспийские государства договорились, что деятельность Сторон на Каспийском море будет осуществляться на основе принципов (Статья 3), в частности

(п. 13) — ответственности Стороны, допускающей загрязнение, за ущерб, причинённый экологической системе Каспийского моря; (п. 14) — охраны природной среды Каспийского моря, сохранения, восстановления и рационального использования его биологических ресурсов; (п. 15) — содействия проведению научных исследований в области экологии, сохранения и использования биологических ресурсов Каспийского моря. Состояние окружающей среды и ответственность сторон за её загрязнение подразумевает знание, в частности, ареалов, источников и объёмов нефтяного загрязнения на всей акватории Каспийского моря, включая территориальные воды всех прикаспийских государств. Независимым и достоверным источником такой информации служат спутниковые данные, полученные различными спутниковыми сенсорами и обработанные по единым апробированным методикам. Научная новизна выполненного проекта заключается в том, что такой многофакторный анализ экологического состояния Каспийского моря был сделан впервые для всей акватории Каспийского моря на основе многосенсорных и мультиплатформенных данных ДЗЗ.

Решение основной задачи проекта было достигнуто посредством выполнения нескольких взаимосвязанных и взаимодополняющих научных задач:

1. Выявление изменчивости относительного вклада основных источников нефтяного загрязнения поверхности Каспийского моря в текущем столетии. Спутниковый мониторинг, проводимый группой ИКИ РАН показал, что существует несколько путей поступления нефтеуглеводородов в акваторию Каспийского моря: а) естественное просачивание углеводородов из недр на поверхность моря; б) большое количество грязевых вулканов, локализованных в западной части Южного Каспия, через жерло которых в воды Каспийского моря выбрасываются нефть и газ; в) морская нефтедобыча и транспортировка; г) сбросы нефтесодержащих вод с судов. Относительный вклад каждого из источников нефтяного загрязнения меняется в различные периоды времени в зависимости от климатических факторов, интенсивности различных гидродинамических и гидрометеорологических процессов, сейсмической активности и хозяйственной деятельности человека. Парадоксально, но до сих пор существует мнение, неоднократно цитируемое в зарубежных публикациях, что основным источником нефтяного загрязнения Каспия является Волга, которая выносит якобы 70 тыс. т нефтепродуктов в год, что не подтверждается данными спутниковых наблюдений.
2. Определение сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости цветения фитопланктона за последние 20 лет. Спутниковые наблюдения показали, что интенсивное цветение фитопланктона наблюдается в первую очередь в Северном Каспии и в устьевых участках рек. Однако известны случаи аномального цветения водорослей, например, в Южном Каспии в 2005 г. Одна из задач проекта — выявление случаев аномального цветения фитопланктона, построение статистики таких наблюдений, выявление районов и причин, его спровоцировавших, и их связи с природными и антропогенными факторами. Например, причины аномального цветения вод Южного Каспия в 2005 г., занимавшего практически половину его акватории и продолжавшегося два месяца, так и остались невыясненными, поскольку ни до, ни после этого случая такие значимые аномалии не наблюдались ни в одном из районов Каспийского моря.

3. Выявление сезонной и межгодовой изменчивости в текущем столетии поля ветра, как основного параметра, определяющего результирующую циркуляцию вод Каспийского моря, и динамические процессы в нём. Применительно к Каспийскому морю эта задача весьма актуальна, поскольку с 1995 г. происходит падение уровня Каспийского моря, которое уже перешло отметку  $-28,5$  м абс. (относительно абсолютной отметки), причём это падение продолжалось даже в те годы, когда наблюдался существенный межгодовой рост притока Волги. Эти факты и последние публикации российских и зарубежных учёных говорят о том, что испарение с поверхности Каспийского моря стало играть главенствующую роль в водном балансе Каспия. Последние исследования участников проекта (Серых, Костяной, 2020) показали, что рост испарения связан не столько с ростом температуры моря, сколько с изменением ветрового режима (а именно, его направления), который обусловлен региональным изменением климата. Кроме того, было показано, что эти процессы имеют периодичность, которая хорошо коррелирует с междекадными (мультидекадными) океаническими модами климатической изменчивости — Атлантической мультидекадной осцилляцией (*англ.* Atlantic Multidecadal Oscillation — АМО) и Междекадной тихоокеанской осцилляцией (*англ.* Interdecadal Pacific Oscillation — IPO).
4. Выявление межгодовой изменчивости и трендов основных гидрометеорологических параметров Каспийского моря: температура поверхности моря (ТПМ), температура воздуха, атмосферные осадки, облачность, уровень. Все эти параметры прямо или косвенно влияют на экологическое состояние Каспийского моря. Исследования участников проекта из Института океанологии им. П. П. Ширшова (ИО РАН) показали, что в Северном, Среднем и Южном Каспии и заливе Кара-Богаз-Гол ТПМ за последние 15 лет увеличилась соответственно на  $0,75$ ;  $1,01$ ;  $1,1$  и  $1,59$  °С, в то время как температура воздуха — только на  $0,6$  °С. Такого значительного расхождения не наблюдалось в предыдущие 20 лет, что требует физического объяснения.
5. Определение межгодовой изменчивости ледяного покрова в Северном Каспии: выявление трендов в сроках льдообразования и очищения ото льда, определение площадей, занятых льдом. Выявление потенциальной опасности ледяного покрова для расположенных в этом районе нефтедобывающих платформ. При среднем уменьшении ледяного покрова Каспийского моря, связанного с региональным потеплением, наблюдаются отдельные годы, когда ледовитость моря существенно возрастает, как это было, например, в 2012 г., когда залив Туркменбаши (Красноводский) покрылся льдом. Необходимо было исследовать, насколько изменилась частота таких явлений в последние десятилетия.
6. Выявление изменений в характере типичных для Каспийского моря гидродинамических процессов, основываясь на анализе многолетних рядов спутниковых данных: тренды в изменчивости поля течений, волновой и вихревой активности. Авторами проекта неоднократно было показано, что именно мезомасштабные и субмезомасштабные гидродинамические процессы существенным образом влияют на перенос (включая трансграничный) загрязняющих веществ в морях России. Исследование межгодовой изменчивости

гидродинамических процессов позволило, например, установить роль этих процессов в самоочищении каспийских вод и в трансграничном переносе в акваториях, особо чувствительных для РФ.

Для решения поставленных задач был осуществлён комплексный подход, объединивший анализ архивных спутниковых данных за 1999–2018 гг. и данных оперативного спутникового мониторинга, проводимого во время выполнения проекта в 2019–2022 гг. Анализ многосенсорных и мультиплатформенных радиолокационных, оптических и инфракрасных (ИК) спутниковых данных был сопряжён с анализом гидрометеорологических и климатических данных, что позволило достоверно установить те или иные причинно-следственные связи в межгодовой изменчивости экологического состояния Каспийского моря.

Уверенность в успешном выполнении задач проекта определялась большим объёмом предварительных исследований, проведённых участниками проекта в области изучения динамических процессов в морях и мониторинга экологического состояния морской среды морей России. За последние 20 лет в ходе выполнения ряда российских и международных проектов коллективом исполнителей накоплен уникальный совместный опыт работы с разнообразной спутниковой информацией о состоянии морей и океанов, разработаны новые методики исследования, которые применяются для комплексного мониторинга экологического состояния морей России. В том числе:

1. Разработан эффективный комплексный (мультисенсорный и междисциплинарный) подход к оперативному спутниковому мониторингу экологического состояния морей России. Впервые такой подход был реализован на практике для района Юго-Восточной Балтики в 2004–2005 гг. Мониторинг базировался на ежедневном приёме, обработке и анализе различных спутниковых данных и включал в себя обнаружение нефтяных пятен в районе нефтедобывающей платформы D-6 на шельфе Калининградской обл. (месторождение «Кравцовское») и во всей юго-восточной части Балтийского моря, обнаружение источников загрязнения, прогноз скорости и направления переноса пятен. Комплексный подход, применённый к мониторингу, выгодно отличал его от соответствующих систем, используемых странами балтийского региона (Финляндии, Швеции, Германии, Норвегии и др.). В ходе работ по мониторингу составлялся еженедельный информационный бюллетень, в котором были представлены анализ гидрометеорологической и ледовой обстановки за неделю; сводка всех обнаруженных нефтяных пятен с их количественными характеристиками; характеристика возможных источников пятен; карта расположения пятен; все информативные спутниковые карты температуры поверхности моря и цвета океана с анализом наблюдаемой на них структуры течений; прогноз распространения наиболее крупных пятен с помощью оперативной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии (*швед.* Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut — SMHI).
2. Коллективом участников проекта из ИКИ РАН разработаны методики обработки, анализа и интерпретации спутниковых радиолокационных изображений, применявшиеся при проведении спутникового мониторинга состояния и загрязнения морской среды российского сектора и побережья Чёрного



- и Азовского морей, который проводится с 2003 г. ежегодно с апреля по октябрь в Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии (НИЦ) «Планета» и в котором сотрудники ИКИ РАН и ИО РАН принимали активное участие. В ходе мониторинга на основе совместного анализа данных, полученных спутниковыми сенсорами, и гидрометеорологической информации регулярно выпускались 13 видов оперативной информационной продукции, включая карты загрязнения моря плёнками поверхностно-активных веществ (ПАВ), распределения фитопланктона и водорослей, концентрации хлорофилла *a*, температуры поверхности моря и др., а также обобщённые карты-схемы состояния и загрязнения морской среды. Аналогичные карты могут строиться на регулярной основе для любых морей.
3. Разработаны методики различения сине-зелёных и диатомовых водорослей на основе совместного анализа спутниковых данных и подспутниковых измерений и проведено апробирование разработанных методик для акваторий Рыбинского водохранилища, Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря.
  4. Предложен оригинальный косвенный метод выявления областей интенсивного цветения водорослей для их последующего картографирования на основе радиолокационных данных, содержащих информацию о наличии биогенных плёнок на морской поверхности и о долгоживущих корабельных следах. Проведена апробация данного метода для выявления областей цветения в Балтийском море.
  5. Разработаны методики восстановления параметров процессов и явлений на поверхности океана и в приземном слое атмосферы на основе данных спутникового дистанционного зондирования и предложен ряд оригинальных моделей, позволяющих перейти от качественной интерпретации наблюдаемых явлений к восстановлению количественных зависимостей, необходимых для решения задач данного проекта.
  6. Разработаны универсальные пакеты алгоритмов и программ целевой обработки цифровых изображений, позволяющие проводить различные виды анализа радиолокационных, радиометрических, оптических изображений и данных контактных измерений.
  7. Проведены исследования вихревой динамики вод. Исследованы различные типы мезомасштабных и мелкомасштабных вихрей и струй, представляющих собой не только механизм переноса загрязнений, но и эффективный механизм «самоочистения» прибрежных вод от загрязнений различной природы, а также механизм переноса вод, нитратов и планктона из прибрежных зон в сторону открытого океана (моря), значительно влияющий на продуктивность удалённых от берега районов.
  8. Проведён сравнительный анализ поверхностных проявлений внутренних волн в различных морях бесприливного типа, выявлены отличительные особенности их возникновения, распространения и проявления в данных спутниковой радиолокации для различных тестовых районов. Исполнители проекта имеют большой опыт натурных экспериментов в различных акваториях и постоянно совершенствуют методики и технологии их проведения.
  9. Участники проекта из ИО РАН, начиная с 1990-х гг., проводят исследования межгодовой изменчивости и трендов основных гидрометеорологических

параметров внутренних морей России (Чёрного, Азовского, Каспийского) на основе использования доступных через интернет баз гидрометеорологических данных, сведений из различных публикаций и результатов натурных измерений. Для Каспийского моря выявлены межгодовая изменчивость и тенденции изменений его гидрометеорологических параметров, чрезвычайно важных для развития инфраструктуры на его берегах и экологии: уровня, стока р. Волги и атмосферных осадков (основных компонентов приходной части водного баланса Каспия), температуры поверхности моря, приводной температуры воздуха, которые во многом определяются глобальными и региональными изменениями климата, вплоть до 2022 г. Продемонстрировано значительное падение уровня моря и зал. Кара-Богаз-Гол в период с 1995 по 2022 г. и показано, что основной причиной падения уровня было не уменьшение речного стока, а увеличившееся испарение с поверхности моря. Эти материалы вошли в Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, который вышел в октябре 2022 г. (Третий..., 2022).

Научная и общественная значимость полученных результатов определяется их важностью для решения экологических проблем Каспийского моря, выявления «горячих точек» с точки зрения различных типов загрязнения морской поверхности, разграничения ответственности между сопредельными странами в случае загрязнения моря и разработки мер для сокращения антропогенного загрязнения Каспия, включая современные методы ДЗЗ и спутникового мониторинга морских акваторий.

Полученные результаты соответствуют мировому уровню, поскольку для Каспийского моря такие комплексные работы были выполнены впервые на основе современных европейских и американских спутниковых систем и баз данных, которые успешно применяются для других районов Мирового океана.

Возможность практического использования полученных результатов в экономике и социальной сфере очевидна и заключается во внедрении разработанных и апробированных методик комплексного спутникового мониторинга Каспийского моря в практику производственного экологического мониторинга компаний, работающих в морской нефтегазовой отрасли, как это было сделано нами для компании «Лукойл-Калининградморнефть» в 2004 г. Эта единственная в РФ система оперативного спутникового мониторинга нефтяного загрязнения, которая продолжает работать по сегодняшний день.

Кроме того, модернизация информационной системы (ИС) See the Sea (STS), входящей в состав объектов инфраструктуры Центра коллективного пользования (ОИ ЦКП) «ИКИ-Мониторинг», позволит использовать её широкому кругу специалистов в области ДЗЗ как в образовательной, так и в научной сфере. ЦКП «ИКИ-Мониторинг», разработанный более 10 лет назад в ИКИ РАН и успешно работающий в настоящее время, будет модернизирован за счёт разработки новых методов дистанционного зондирования Земли из космоса, пополнения базы данных See the Sea спутниковыми изображениями по Каспийскому морю за 2019–2022 гг. Проект также способствовал решению задач перехода к цифровым, интеллектуальным технологиям и автоматизированным системам посредством развития, поддержания и практического применения создаваемой системы обработки больших объёмов спутниковых

данных (big data — больших данных). Эта система позволяет на современном технологическом и научном уровне проводить исследования межгодовой изменчивости нефтяного загрязнения, загрязнения взвешенным веществом, цветения вод, ледяного покрова, сгонно-нагонных явлений и гидродинамического режима Каспийского моря по данным дистанционного зондирования для принятия важных стратегических решений в развитии Прикаспийского региона. В частности, это позволит дать научно-обоснованные рекомендации для реализации «Стратегии развития российских морских портов в Каспийском бассейне, железнодорожных и автомобильных подходов к ним в период до 2030 года», принятой Распоряжением Правительства РФ от 8 ноября 2017 г. № 2469-р.

Эти исследования имеют чрезвычайно большое значение не только для Российской Федерации, но и для всех прикаспийских стран, поскольку региональное изменение климата и падение уровня Каспия существенным образом отражается на прибрежной инфраструктуре прикаспийских стран (развитие морского транспорта, добыча нефти и газа в море, строительство новых портов, терминалов и подводных трубопроводов), сельском хозяйстве и урбанизации прибрежной зоны Каспия.

Кроме того, результаты, полученные в рамках проекта, смогут стать в дальнейшем важным вкладом ИКИ РАН в выполнении проекта The Caspian Sea Digital Twin («Цифровой двойник Каспийского моря»), который в октябре 2021 г. был одобрен Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО и включён в Программу реализации Десятилетия ООН наук об океане в интересах устойчивого развития на 2021–2030 гг. (<https://www.oceandecade.org/actions/the-caspian-sea-digital-twin-casseadi/>). Цель программы: создание The Caspian Sea Data Center, который бы включал постоянно пополняемый архив спутниковых данных (ИК, оптика, радиолокация, альтиметрия), океанографических данных (физические, химические, биологические параметры), гидрометеорологические данные, данные гидродинамических моделей, данные атмосферных реанализов, результаты прогнозов регионального изменения климата, электронные атласы, электронную библиотеку публикаций по Каспийскому морю и другие материалы. Собранные данные позволят сделать оценки антропогенных нагрузок на окружающую среду Каспийского моря, оценки происходящих изменений климата, оценки экстремальных погодных и климатических событий, оценки влияния изменения климата на природные и социально-экономические системы, разработать стратегию и механизмы адаптации к изменению климата и состояния Каспийского моря. Созданная инфраструктура позволит поддерживать современными информационными ресурсами страны Каспийского моря в создании улучшенных условий для устойчивого развития региона Каспийского моря. В будущем проект The Caspian Sea Data Center может быть преобразован в The Caspian Sea Analytical Data Center с дополнительными консалтинговыми функциями. В программе The Caspian Sea Digital Twin принимают участие 24 команды из 23 организаций из России, Азербайджана, Казахстана, Ирана, Франции и Швейцарии, которые предложили свои направления исследований. В общей сложности программа объединяет 190 специалистов в различных областях знаний и полноправными участниками этого консорциума стали две команды из ИКИ РАН.

Авторы настоящей книги давно и плодотворно работают вместе над проблемами окружающей среды морей России и развития методов дистанционного зондирования морей и океанов в рамках целого ряда международных и национальных научных

проектов. В 2011 и 2016 гг. эти работы были обобщены в двух монографиях: *Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с. и *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с. Предлагаемая читателю книга — продолжение данной серии с обобщением новых результатов, полученных по исследованию Каспийского моря в рамках проекта РНФ № 19-77-20060 «Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования».

Авторы выражают благодарность всем участникам проекта, внёсшим свой вклад в получение результатов, представленных в настоящей монографии: кандидату физико-математических наук А. И. Гинзбург (ИО РАН), К. Р. Назировой, Е. В. Краюшкину, Н. А. Князеву, кандидату биологических наук А. Я. Строчкову (ИКИ РАН), кандидату геолого-минералогических наук Я. О. Алферьевой (Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова).

Особую благодарность авторы выражают сотрудникам отдела «Технологии спутникового мониторинга» ИКИ РАН, возглавляемого доктором технических наук Е. А. Лупяном за разработку и постоянное усовершенствование спутникового информационного сервиса See the Sea, выступающего составной частью ОИ ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Без этого информационного сервиса работа с огромным объёмом многосенсорных спутниковых данных и проведение исследования, результаты которого положены в основу настоящей монографии, оказались бы невозможными.

Особую благодарность и признательность авторы выражают Н. Ю. Комаровой за подготовку рукописи к публикации.

Авторы выражают свою благодарность Российскому научному фонду за финансовую помощь в проведении научных исследований и за финансовую поддержку издания представленной книги.

## ЛИТЕРАТУРА

- Серых И. В., Костяной А. Г.* О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 96–107.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.

Формат 70×1001/16. Усл. печ. л. 20,42.  
Тираж 250 экз. Заказ № 528.

Отпечатано с оригинал-макета заказчика  
по заказу ООО «ИИА «Пресс-Меню»  
в ООО «ТИПОГРАФИЯ КРАСНЫЙ ОКТЯБРЬ»  
430030, г. Саранск, ул. Титова, 2а  
E-mail: tko-saransk@mail.ru