

## Конкурс научных работ ИКИ ран 2024 г.

### Цикл из 3 статей «Развитие методики расчёта баланса парниковых газов по данным ДЗЗ»

#### Авторы:

1. Ермаков Д.М., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В., Втюрин С.А., Чернушич А.П.
2. Садовский И.Н., Пашинов Е.В., Сазонов Д.С.
3. Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Ермаков Д.М., Садовский И.Н.

#### Название:

1. Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения.
2. Анализ возможности расчёта элементов баланса атмосферных парниковых газов по современным данным спутникового мониторинга.
3. Отработка методики балансовых расчётов выбросов парниковых газов по данным спутникового мониторинга на примере крупных лесных пожаров.

#### Ссылки на публикацию:

1. Ермаков Д.М., Пашинов Е.В., Кузьмин А.В., Втюрин С.А., Чернушич А.П. Концепция расчета элементов регионального гидрологического баланса с использованием спутникового радиотепловидения // Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 470-492. DOI: [10.33933/2713-3001-2023-72-470-492](https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-72-470-492).
2. Садовский И.Н., Пашинов Е.В., Сазонов Д.С. Анализ возможности расчёта элементов баланса атмосферных парниковых газов по современным данным спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 117-128. DOI: [10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-117-128)
3. Пашинов Е.В., Втюрин С.А., Ермаков Д.М., Садовский И.Н. Отработка методики балансовых расчётов выбросов парниковых газов по данным спутникового мониторинга на примере крупных лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 313-325. DOI: [10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-6-313-325).

#### Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность.

В настоящее время большой интерес представляют исследования баланса парниковых газов (ПГ) в атмосфере над различными территориями. При этом вызывает интерес изучение не только углерод содержащих парниковых газов, но и водяного пара- как самого сильного из них. Обеспечение отрицательного или около нулевого баланса углеродсодержащих парниковых газов является задачей многочисленных стран, входящих в международные договоры по ограничению выбросов. Водяной пар же является частью гидрологического цикла, а изменения параметров гидрологического цикла являются одними из важных следствий и индикаторов региональной и глобальной климатической изменчивости.

Существующие подходы к оценке баланса углерод содержащих газовых компонент атмосферы (кадастровый, прямых измерений на полигонах, инверсного моделирования) имеют множества недостатков и ограничений. Поэтому актуально развитие новых методик, основанных на прямом анализе данных дистанционного зондирования.

Также представляет интерес не только с фундаментальной, но и с научно-прикладной точки зрения развитие методов расчета и прогнозирования изменений параметров гидрологического цикла. Увлажнение территории и его динамика обуславливают как текущее состояние, так и возможную трансформацию экосистемы; во многом определяют величину речного стока, как компоненты гидрологического цикла, при формировании специфических погодных условий создают риски развития наводнений или засух. Так, по данным Европейского агентства по окружающей среде наводнения в Европе привели к экономическим потерям в 60 млрд. евро и гибели 1126 человек в период с 1998 по 2009, что инициировало разработку Европейской Системы Оповещения о Наводнениях. Аналогичные системы развиваются и в России. Известно, например, что сильные наводнения на Амуре вызываются затяжными осадками. Тем не менее, публикации, обсуждающие вопросы развития средств анализа и прогноза изменений элементов регионального гидрологического цикла, в том числе, в связи с измене-

ниями речного стока и уровня водоемов для территорий России, по-прежнему сравнительно редки.

### **Конкретная решаемая в работе задача и ее значение.**

Существует два основных методических подхода для определения баланса парниковых газов: на базе прямых изменений на интересующих территориях и с помощью модельных оценок на основе всей имеющейся информации для данной территории об их содержании. Для углерод содержащих парниковых газов антропогенного происхождения ещё имеется кадастровый подход, заключающийся в расчётах на основе инвентарной информации о типах и параметрах источников и поглотителей ПГ на данной территории и утверждённых модельных соотношений. Очевидным недостатком первого подхода, в общем случае, является редкость и неравномерность измерений по пространству. Второй подход опирается на процедуру усвоения данных разнородных измерений в сложных циркуляционных моделях, и его результаты нуждаются в проверке с использованием репрезентативных объемов независимых фактических наблюдений. В рамках кадастрового подхода проблему представляет полное параметрическое описание всех возможных типов источников ПГ с учётом их изменчивости.

В настоящем цикле работ рассмотрена концепция нового подхода, основанного на вычислительной схеме, замкнутой относительно данных спутникового мониторинга концентраций парниковых газов. Его результаты, таким образом, можно считать в значительной степени независимыми от других подходов (при известных, сделанных ниже оговорках) и опирающимися исключительно на данные фактических (дистанционных) наблюдений. Такой подход обладает рядом преимуществ: высокая оперативность при малых затратах вычислительных мощностей, глобальный охват земного шара с высоким пространственным и временным разрешением, потенциальная возможность обнаружения новых эффектов и явлений, которые не могут быть воспроизведены моделями.

### **Используемый подход, его новизна и оригинальность:**

В конкурсном цикле работ представлена концепция расчёта элементов баланса парниковых газов на основе дистанционных измерений из космоса. Элементы баланса парникового газа за определённый интервал времени для произвольной площади можно вычислить с помощью уравнения баланса:

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} B(t) dt = - \int_A \int M(x, y) dx dy \left[ \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} dt \int_{\Gamma} F(x, y) dn, \right]$$

где  $B$  - «мгновенный» баланс ПГ для заданной территории  $A$ , т.е. разность между интенсивностью эмиссии и стока ПГ (в  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ );  $M(x, y)$  — массовое содержание ПГ в вертикальном атмосферном столбе единичной площади (в  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$ );  $\Gamma$  — ориентированная замкнутая граница области  $A$  (см. далее);  $\mathbf{n}$  — ориентированная нормаль к границе  $\Gamma$  (положительное направление – внутрь контура);  $\mathbf{F}$  — интегральный по высоте атмосферы горизонтальный поток ПГ (в  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Соответственно, для вычисления баланса за некоторый период времени в заданной области необходимо знать изменение количества массового содержания ПГ между начальным и конечным моментом времени в заданной области и суммарную конвергенцию газа в область за период времени. Спутниковые пассивные микроволновые и инфракрасные измерения имеют высокую чувствительность к интегральному содержанию большинства ПГ в атмосфере Земли.

Авторами была предложена методика восстановления интегральных по высоте атмосферы горизонтальных потоков ПГ по данным спутникового мониторинга, которая была продемонстрирована в рамках подхода спутникового радиотепловидения. Суть методики состоит в вычислении такого поля скорости горизонтального переноса, которое оптимальным образом описывает последовательную трансформацию полей интегрального содержания ПГ, выстроенных в хронологическом порядке, при дополнительных ограничительных требованиях (непрерывности, гладкости). Реализующие такой подход алгоритмы в системах технического зрения получили название «анализа оптического потока». Одновременное восстановление полей интегрального содержания ПГ и эффективной (взвешенной по высоте) скорости горизонтального переноса ПГ обеспечивает расчет интегрированных по высоте адвективных потоков ПГ. Для интегрального влагосодержания атмосферы составляет сложность микроволновых измерений над сушей из-за того, что в этом случае существенно (в разы) ниже как

величины интегрального влагосодержания, при ухудшении чувствительности измерений к водяному пару, так и скорости адвекции. Поэтому были разработаны специальные нееросетевые алгоритмы восстановления интегрального паросодержания атмосферы над сушей и проведён тщательный выбор метода анализа оптического потока. Так же, были использованы методы контекстной обработки изображений для заполнения отсутствующих из-за облачности данных ИК измерений содержания ПГ.

#### **Полученные результаты и их значимость:**

В цикле работ сформулирована и отработана методика оценки баланса парниковых газов на основе применения алгоритмов технического зрения к полям измерений концентраций ПГ из космоса и вычислении элементов уравнения баланса. Её важным преимуществом по отношению к подходам, использующим моделирование и полевые измерения, является опора на регулярные, однородные, плотные по пространству и достаточно частые по времени фактические (спутниковые) наблюдения. В этом смысле такой подход создаёт важную альтернативу подходам на базе численного моделирования.

Можно выделить следующие основные шаги алгоритмизации оценки баланса парниковых газов:

1. Подсчёт общего количества газа, содержащегося над заданной областью в начальный и конечный моменты рассматриваемого интервала времени.
2. Подсчёт эффективной конвергенции/дивергенции потока газа, прошедшего через внешние контуры области за рассматриваемый интервал времени;
3. Решение уравнения баланса, в котором недостаток/избыток газа в конечный момент времени по сравнению с зарегистрированным ранее обусловлен разницей между поглощённым и выброшенным с данной территории газом.

Методика была изначально разработана применительно к радиотепловым измерениям содержания водяного пара в атмосфере. Была показана адекватность её оценок горизонтального потока водяного пара по сравнению с данными реанализа

Следующим этапом методика была опробована на спутниковых измерениях концентрации CO инструментом TROPOMI в области сильного лесного пожара. Лесные пожары являются очень контрастными объектами в поле концентраций угарного газа, где его содержание может увеличиваться до 30 раз по сравнению с фоном. Было показано, что методика позволяет подсчитать выброс CO за счёт пожара, сравнение с модельными данными показывает качественное согласие результатов оценки выбросов. Дальнейший прогресс в развитии методики связан, в том числе, с совершенствованием инструментов и систем спутникового мониторинга концентраций ПГ, а также алгоритмов предобработки дистанционных данных.