

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ CO₂ НАД КРУПНЫМИ АКВАТОРИЯМИ БОРЕАЛЬНОЙ И СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ С ИХ ФЕНОЛОГИЧЕСКИМИ ФАЗАМИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫМИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS

© 2024 г. В. В. Тихонов^{1,2,*}, Е. В. Пашинов¹, Д. М. Ермаков^{1,3},
И. В. Хвостов², А. Н. Романов²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

³Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

*E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

Приводятся результаты сравнения данных реанализа о содержании углекислого газа в атмосфере и фенологических фаз крупных пресноводных акваторий, расположенных в бореальной и субарктической зоне, за 2012–2020 гг. В работе использованы данные реанализа CAMS global greenhouse gas reanalysis, которые представляют собой трехмерные поля содержания аэрозолей и химических составляющих в атмосфере, с полным покрытием земного шара. В данном исследовании использовались данные о среднем содержании CO₂ в столбе воздуха над акваториями. Фенологические фазы пресноводных водоемов (водная поверхность, ледяной покров, разрушения льда) определялись по данным микроволнового радиометра MIRAS спутника SMOS. Проведенное сравнение и выполненный анализ показали, что концентрация CO₂ в атмосфере над исследуемыми акваториями имеет сезонный циклический характер. Минимум концентрации соответствует летнему периоду из-за сильного фотосинтеза в акваториях, в результате которого углекислый газ поглощается в толще воды. Максимум концентрации CO₂ над акваториями соответствует периоду разрушения ледяного покрова, приводящего к высвобождению накопленного за зимний период углекислого газа, который “запечатан” во льду и в водной толще подо льдом. У замерзающих озер, находящихся в бореальной зоне, помимо стабильного весеннего максимума CO₂ иногда наблюдается сильный кратковременный выброс углекислого газа, также соответствующий стадии разрушения ледяного покрова. Этот выброс объясняется более высокой биопродуктивностью водоемов бореальной зоны по сравнению с акваториями субарктической зоны.

Ключевые слова: крупные акватории, фенологические фазы, бореальная и субарктическая зона, углекислый газ, спутниковая микроволновая радиометрия, ледяной покров

DOI: 10.31857/S0205961424010064, EDN: GMMDLU

ВВЕДЕНИЕ

Различные пресноводные акватории Северного полушария (озера, пруды, водохранилища, заливы и т.п.) выступают важнейшим компонентом бореальных и субарктических ландшафтов. Они также представляют собой важный элемент регионального баланса углерода. Акватории функционируют как переносчики и преобразователи большого количества углерода, полученного естественным и антропогенным путем. Эти водные объекты служат пассивными каналами переноса углерода от почвы к морю, а также отводят углерод из наземной среды в атмосферу и осаждают его в донные отложения (Engel et al., 2018; Rantala et al., 2016; Tranvik et al., 2009; Wen et al., 2021).

Потепление климата оказывает огромное влияние на функционирование водных экосистем. Важным фактором в этой динамике становится органический углерод, который связан с несколькими жизненно важными функциями экосистемы через влияние на биологическую продукцию и физико-химические свойства акваторий. В работах (Engel et al., 2018; Rantala et al., 2016; Tranvik et al., 2009; Wen et al., 2021) показана тесная связь между водными объектами субарктической и бореальной зоны и наземной средой. Помимо влияния водосбора эти исследования показали, что запасы органического углерода в донных отложениях определяются глубиной водной толщи. Предполагается, что влияние глубины связано с влиянием ослабления света, а также микробных процессов в толще воды

и на границе раздела осадок – вода. Экосистемы высоких широт подвергаются серьезным трансформациям в условиях изменения климата, однако механизмы положительных и отрицательных климатических обратных связей до конца не изучены. Для глобального баланса углерода особенно важна судьба его огромных запасов в северных водно-болотных угодьях. Предполагается, что вынос органического углерода из наземной среды будет увеличиваться в северных регионах с ростом температуры и осадков. Наличие участков вечной мерзлоты может давать дополнительный вклад в вынос углерода при оттаивании. Вследствие тесного взаимодействия водосбор – озеро изменение климата может привести к возникновению положительной обратной связи, которая ускорит перемещение наземного углерода в атмосферу через водную среду. На рис. 1 представлена типичная схема цикла органического углерода в озерах субарктической и бореальной зоны, который определяется различными внешними воздействиями.

Роль озер и водохранилищ в переносе и трансформации растворенного неорганического углерода зависит от характеристик каждого водоема. Например, потребление и производство CO_2 внутри акватории может быть наиболее важным фактором динамики углерода в теплых эвтрофных озерах, в то время как боковой перенос CO_2 может быть очень

значительным в бореальных и субарктических водоемах (Weyhenmeyer et al., 2015).

В высоких широтах уменьшение продолжительности снежного покрова и таяние вечной мерзлоты приводит к увеличению содержания органического углерода в близлежащих акваториях (Zimov et al., 2006). Изменения в продолжительности существования ледяного и снежного покрова, а также деградация вечной мерзлоты влияют на поток углерода с водосбора, оказывая воздействие как на сток, так и на растительность. Продолжительность основного сезона вегетации и стока, определяемая среднегодовой температурой воздуха, представляется хорошим предсказателем изменения концентрации органического углерода во временном и пространственном масштабе (Weyhenmeyer, Karlsson 2009). Содержание CO_2 во внутренних водах часто демонстрирует значительную изменчивость в сезонном масштабе (Wen et al., 2021). По сравнению с другими сезонами года концентрация CO_2 летом, как правило, низкая из-за сильного фотосинтеза фитопланктона в озерах и водохранилищах, который поглощает углекислый газ в толще воды. Период таяния льда – критический временной интервал для выбросов CO_2 из бореальных и субарктических акваторий (Denfeld et al., 2015, 2016; Karlsson et al., 2013), поскольку накопленный CO_2 , заключенный во льду и находящийся в подледной воде, может

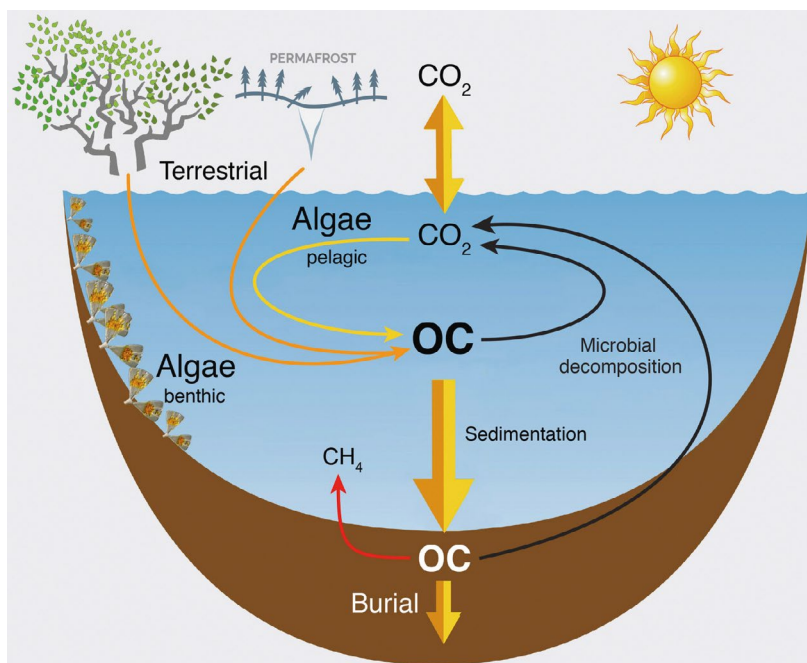


Рис. 1. Цикл органического углерода в озерах субарктической и бореальной зоны (<https://www.arcticcirc.net/research-interests/gudas-lake-carbon-cycles>). Terrestrial – наземный; Algae pelagic – водоросли пелагические (растения или животные, обитающие в толще или на поверхности воды); Algae benthic – водоросли бентосные (совокупность организмов, обитающих на грунте и в грунте дна водоемов); Microbial decomposition – микробное разложение; Sedimentation – осаждение; Burial – захоронение.

быть быстро выброшен в атмосферу во время таяния ледяного покрова. В олиготрофных озерах сезонные колебания концентрации CO₂ могут быть вызваны изменением растворенного неорганического углерода и аллохтонного органического вещества (Wen et al., 2021).

В работе (Denfeld et al., 2016) представлены данные по изменчивости парциального давления углекислого газа (pCO₂) подо льдом для 506 шведских и финских озер, полученных либо прямыми измерениями, либо рассчитанные по значениям общего неорганического углерода, щелочности, pH, температуры воды и высоты над уровнем моря по различным методикам. Эти исследования показали, что химический состав воды и морфометрия озер представляются более важными факторами, определяющими подледное содержание pCO₂ в региональном масштабе, чем климатические переменные (температура воздуха и продолжительность существования ледяного покрова). Накопление CO₂ в подледных озерах происходит за счет микробной минерализации питательных веществ и органического вещества в донных отложениях и поступления CO₂ с водосбора до начала таяния льда. В работе сделан вывод, что в региональном масштабе круговорот углерода в покрытых льдом озерах и последующая эмиссия CO₂ при таянии льда становятся важными составляющими годовой эмиссии углекислого газа. Учитывая возможность значительных экосистемных изменений в озерах, покрытых льдом, исследование периода существования ледяного покрова в глобальной оценке эмиссии CO₂ должно включать в себя мониторинг изменений не только ледового покрова, но и трофического статуса озер.

Анализ процессов, связанных с органическим и неорганическим углеродом в различных акваториях (включая биологическую деятельность, физическое перемешивание, термодинамический процесс и газообмен между воздухом и водой), становится ключом к пониманию их роли в глобальном углеродном цикле, а также климатических изменений, происходящих на нашей планете.

Настоящая работа посвящена оценке взаимосвязи данных реанализа о содержании углекислого газа в атмосфере и данных спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) о фенологических фазах крупных акваторий Северного полушария, расположенных в бореальной и субарктической зоне, за 2012–2020 гг. Целью работы было показать сезонную цикличность концентрации CO₂ над крупными пресноводными акваториями, которая связана с фенологическими фазами водоемов (открытая вода, ледяной покров, разрушение и таяние льда), и продемонстрировать, что для всех подобных акваторий динамика концентрации CO₂ схожа, и ее максимум наблюдается в начале весеннего периода, когда разрушается ледяной покров у замерзающих озер.

ИССЛЕДУЕМЫЕ АКВАТОРИИ

В качестве исследуемых акваторий было выбрано шесть крупных пресноводных, замерзающих водных объектов, расположенных в различных природных зонах Северного полушария: оз. Байкал, Ладожское оз., оз. Гурон, Большое Невольничье и Большое Медвежье озера, а также южная (пресноводная) часть Обской губы (рис. 2). На рис. 2 зеленым цветом выделена область, соответствующая ячейке L1C SMOS (см. разд. “Спутниковые данные”). В табл. 1 указаны регионы и природные зоны, в которых расположены исследуемые акватории, а также координаты центра анализируемых ячеек L1C SMOS.

ДАННЫЕ РЕАНАЛИЗА

Для оценки содержания углекислого газа в атмосфере над исследуемыми акваториями были использованы данные реанализа CAMS (*англ.* Copernicus Atmosphere Monitoring Service) global greenhouse gas reanalysis (EGG4) (Inness et al., 2019). CAMS считается крупнейшим набором данных реанализа о составе атмосферы, предоставляемым Европейским центром среднесрочных прогнозов

Таблица 1. Исследуемые акватории и координаты центра ячеек L1C SMOS

Акватория	Регион / природная зона	Координаты
Оз. Байкал	Южная Сибирь / бореальная зона	54.17° с.ш., 108.91° в.д.
Ладожское оз.	Северо-запад России / бореальная зона	60.88° с.ш., 31.37° в.д.
Обская губа, южная часть	Север Западной Сибири / субарктическая зона	67.21° с.ш., 73.22° в.д.
Оз. Гурон	Великие американские озера / бореальная зона	44.56° с.ш., 82.41° з.д.
Большое Невольничье оз.	Северо-запад Канады / бореальная зона	61.28° с.ш., 114.8° з.д.
Большое Медвежье оз.	Северо-запад Канады / субарктическая зона	65.97° с.ш., 120.5° з.д.

(англ. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF). Он состоит из трехмерных полей данных об аэрозолях и химических составляющих атмосферы с полным покрытием земного шара. В настоящий момент доступны данные за период с 2003 по 2020 г. Реанализ CAMS EGG4 – продукт 4d-var системы ассимиляции, в основе которой лежит модель прогноза ECMWF

IFS CY42R1 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>). Реанализ ассимилирует данные спутникового дистанционного зондирования земли в 12-часовом временном окне с 00:09 до 21:00 UTC (англ. Coordinated Universal Time) и с 21:00 до 09:00 UTC и обеспечивает глобальные поля атмосферных параметров на регулярной сетке коор-

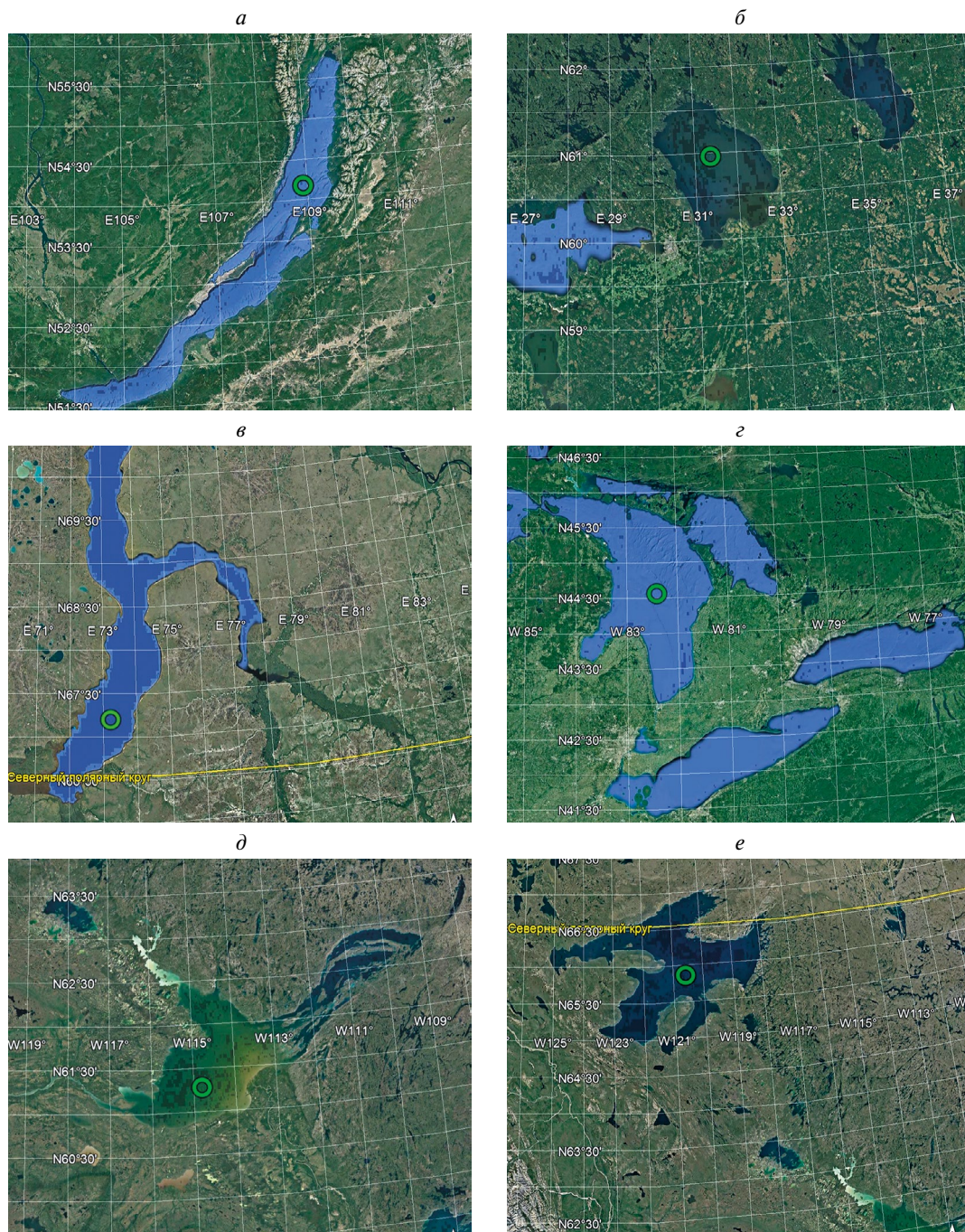


Рис. 2. Исследуемые акватории: а – оз. Байкал; б – Ладожское оз.; в – Обская губа; г – оз. Гурон; д – Большое Невольничье оз.; е – Большое Медвежье оз. Зеленым цветом указана область, соответствующая ячейке LIC SMOS.

динат $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ с временной периодичностью 3 ч. В работе использовались данные CAMS EGG4 о среднем содержании CO₂ в столбе воздуха (в ppm). Ошибки данных реанализа CAMS EGG4 по CO₂ и по данным наземных экспериментов в среднем находятся в пределах 1% в нижних слоях тропосферы (https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2021-04/CAMS84_2018SC3_D5.1.2-2020.pdf). Данные реанализа CAMS EGG4 были получены с сервера <https://atmosphere.copernicus.eu/> и совмещены по пространству и времени с данными по яркостной температуре, полученной из продукта L1C SMOS за период 2012–2020 гг.

СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Для определения фенологических фаз (водная поверхность, ледяной покров, разрушение ледяного покрова), выбранных для исследования акваторий, были использованы данные продукта L1C SMOS.

Яркостная температура поверхности Земли Т_Я на горизонтальной Т_Н и вертикальной Т_У поляризации измеряется в диапазоне углов зондирования 0°–60° микроволновым радиометром MIRAS (англ. Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) (Kerr et al., 2010). Радиометр MIRAS размещен на спутнике Европейского космического агентства (англ. European Space Agency – ESA) SMOS. Он принимает восходящее излучение на частоте 1.41 ГГц. Максимальный пространственный охват достигается при угле визирования 42.5°, при этом пространственное разрешение составляет

35 × 65 км (Gutierrez et al., 2017). Данные продукта L1C SMOS привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9, линейный размер ячейки которой составляет порядка 16 км, а площадь – около 195 км² (Sahr et al., 2003). Таким образом, значение яркостной температуры для любой ячейки продукта L1C формируется участком подстилающей поверхности площадью 1760 км² (по уровню 3 дБ). Сама же ячейка площадью 195 км² расположена в центре этого участка (Sahr et al., 2003). Для достижения максимальной достоверности из анализа были исключены следующие измерения:

- 1) значения, связанные с влиянием радиочастотных помех;
- 2) данные с погрешностью определения Т_Н и Т_У более 5 К;
- 3) данные с коэффициентом поляризации (Т_Н/Т_У) вне диапазона 0.01–0.99.

Непрерывный архив данных L1C SMOS с 2012 г. по настоящее время хранится на серверах Европейского космического агентства.

В работах (Тихонов и др., 2017; 2021; Tikhonov et al., 2018; 2022) на основе теоретического моделирования собственного микроволнового излучения пресноводных акваторий (озера, заливы) и анализа яркостной температуры, измеряемой радиометром MIRAS, показана возможность определения сезонных изменений состояния их поверхности. Сопоставление спутниковых данных с модельными расчетами позволило выявить для замерзающих пресноводных акваторий три временные области

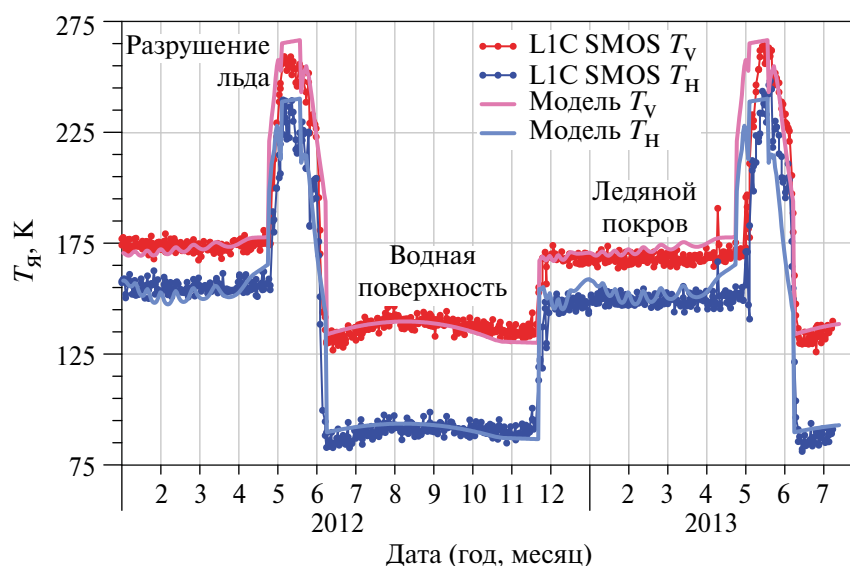


Рис. 3. Сезонные вариации яркостной температуры и соответствующие им фенологические фазы для Большого Невольничьего оз. (северо-запад Канады).

яркостной температуры: первая область связана с излучением свободной ото льда водной поверхности; вторая – с установившимся на поверхности озер ледяным покровом; а третья область, характеризующаяся кратковременным резким возрастанием яркостной температуры на величину порядка 40–90 К, соответствует периоду кардинального изменения в структуре ледяного покрова (период интенсивного разрушения и таяния) (рис. 3).

Сезонная динамика содержания углекислого газа в атмосфере над исследуемыми акваториями была сопоставлена с сезонными изменениями фенологических фаз акваторий, определенных по данным спутника SMOS, за период 2012–2020 гг. Результаты и анализ этого сравнения представлены в следующем разделе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена динамика яркостной температуры выбранных ячеек (продукт L1C SMOS) для исследуемых акваторий (см. рис. 2) и динамика содержания CO₂ над ними, полученная по данным CAMS EGG4, за 2012–2020 гг. (для Обской губы за 2012–2018 гг.).

Гидрологические данные по исследуемым акваториям (Войнов и др., 2017; Каретников, 2021; Румянцев и др., 2012), а также проведенное сравнение сезонной динамики яркостной температуры и содержания CO₂ позволило разделить их на три вида: редко полностью замерзающие акватории бореальной зоны (Ладожское оз. и оз. Гурон), замерзающие акватории бореальной зоны (оз. Байкал и Большое Невольничье оз.), акватории субарктической зоны (Обская губа и Большое Медвежье оз.).

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 4) в целом показал, что концентрация CO₂ в атмосфере над исследуемыми акваториями имеет сезонный циклический характер. Минимум концентрации соответствует летнему периоду из-за сильного фотосинтеза фитопланктона в акваториях, в результате которого углекислый газ поглощается в толще воды. Максимум концентрации CO₂ над акваториями соответствует окончанию зимнего (холодного) периода. Зимой из-за сильного понижения температуры воды резко уменьшается фотосинтез, что приводит к сильному уменьшению поглощения CO₂ в водной толще, и соответственно увеличению его концентрации в воде, и эмиссии из акваторий. Такая динамика яркостной температуры и концентрации CO₂ характерна для всех исследуемых водных объектов как постоянно замерзающих в зимний период, так и не всегда замерзающих зимой.

Для постоянно замерзающих акваторий максимум концентрации CO₂ над ними соответствует

периоду разрушения ледяного покрова (сильное возрастание яркостной температуры весной), приводящего к высвобождению накопленного за зимний период углекислого газа, который был “запечатан” во льду и в водной толще подо льдом (см. рис. 4а, в, д, е). Такая же динамика характерна и для редко полностью замерзающих водоемов: Ладожское оз. в 2012, 2013 и 2016–2018 гг. (см. рис. 4б); оз. Гурон в 2014 и 2015 гг. (см. рис. 4г). У замерзающих озер, находящихся в бореальной зоне, помимо стабильного весеннего максимума CO₂ иногда наблюдается сильный кратковременный выброс углекислого газа, также соответствующий стадии разрушения ледяного покрова: для оз. Байкал в 2012, 2014, 2015, 2017 и 2019 гг. (см. рис. 4а); для Большого Невольничьего оз. в 2012, 2014, 2015 и 2019 гг. (см. рис. 4д).

На рис. 5 показана сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO₂ для двух озер в более хорошем разрешении за период 2012–2014 гг. На этом рисунке представлены два характерных для бореальной и субарктической зоны озера: Байкал и Большое Медвежье, соответственно. Из рис. 5 видно, что кратковременный выброс углекислого газа у оз. Байкал (см. рис. 5а) соответствует стадии окончания разрушения льда на озере (2012 и 2014 гг.). У Большого Медвежьего озера, расположенного в субарктической зоне, такого выброса не наблюдается (см. рис. 5б). Такой характерный выброс объясняется более высокой биопродуктивностью водоемов бореальной зоны по сравнению с акваториями субарктической зоны и, соответственно, большим накоплением углекислого газа в водной толще за период ледостава. Отсутствие таких выбросов в некоторые годы у замерзающих озер бореальной зоны требует дальнейшего исследования. Вероятно, оно связано с какими-то гидрологическими и биохимическими процессами, происходящими в этих акваториях.

Сравнение двух на первый взгляд похожих озер, расположенных на северо-западе Канады (Большое Невольничье и Большое Медвежье) показало, что они сильно различаются своей биопродуктивностью. Озеро Большое Медвежье, расположенное в субарктической зоне, является ультраолиготрофным. Низкая температура воды, слабая обеспеченность биогенными элементами, отсутствие источников загрязнения обуславливают низкую биологическую продуктивность озера. Для этого озера характерна малая доля растворенных в воде питательных веществ, высшая водная растительность практически отсутствует, рыбная продукция низкая, видовое разнообразие фитопланктона очень мало (Румянцев и др., 2012). Озеро Большое Невольничье, которое расположено на границе бореальной и субарктической зоны, является олиготрофным. В озеро впадает р. Невольничья,

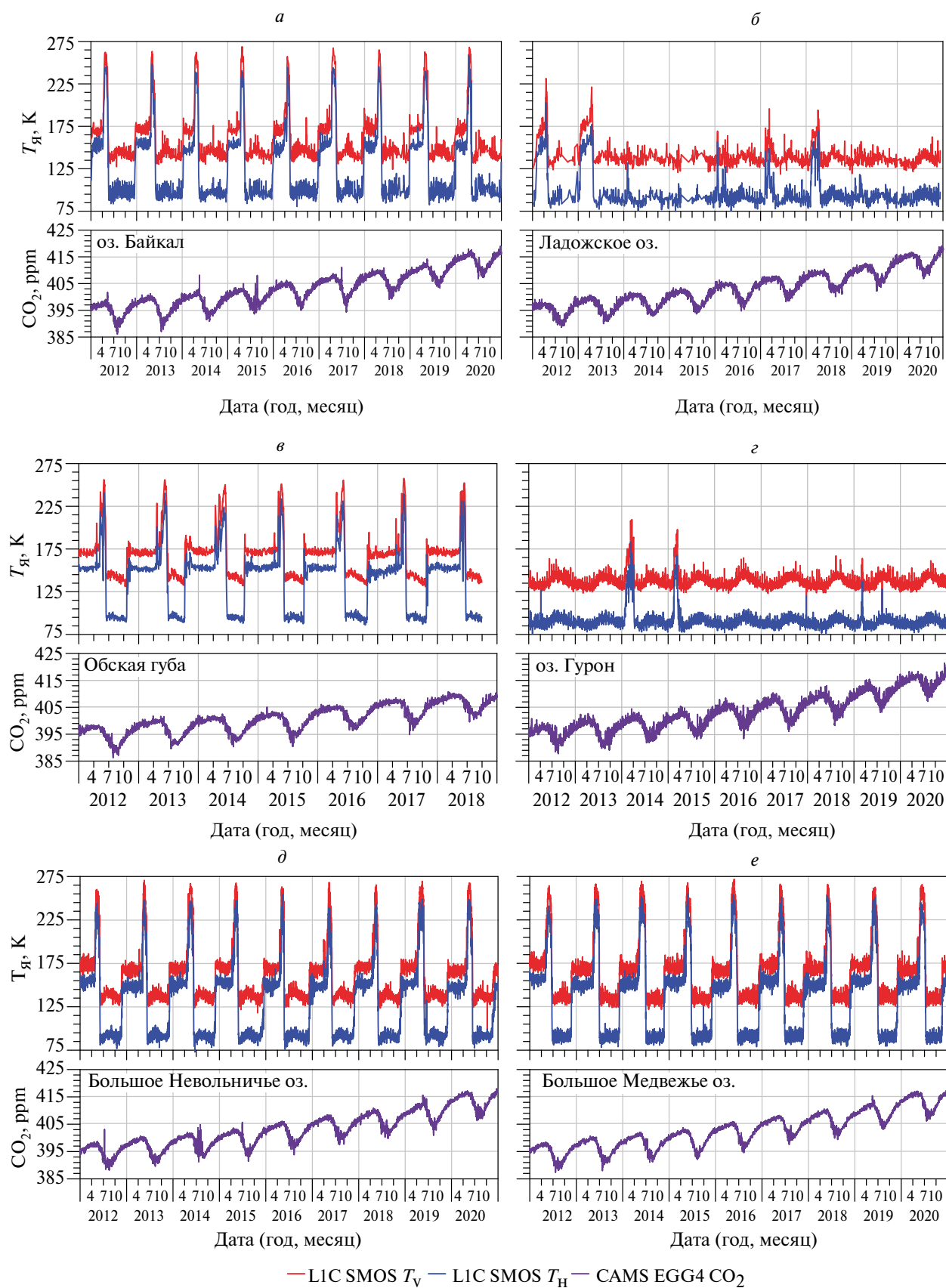


Рис. 4. Сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO₂ для исследуемых акваторий: *а* – оз. Байкал; *б* – Ладожское оз.; *в* – Обская губа; *г* – оз. Гурон; *д* – Большое Невольничье оз.; *е* – Большое Медвежье оз.

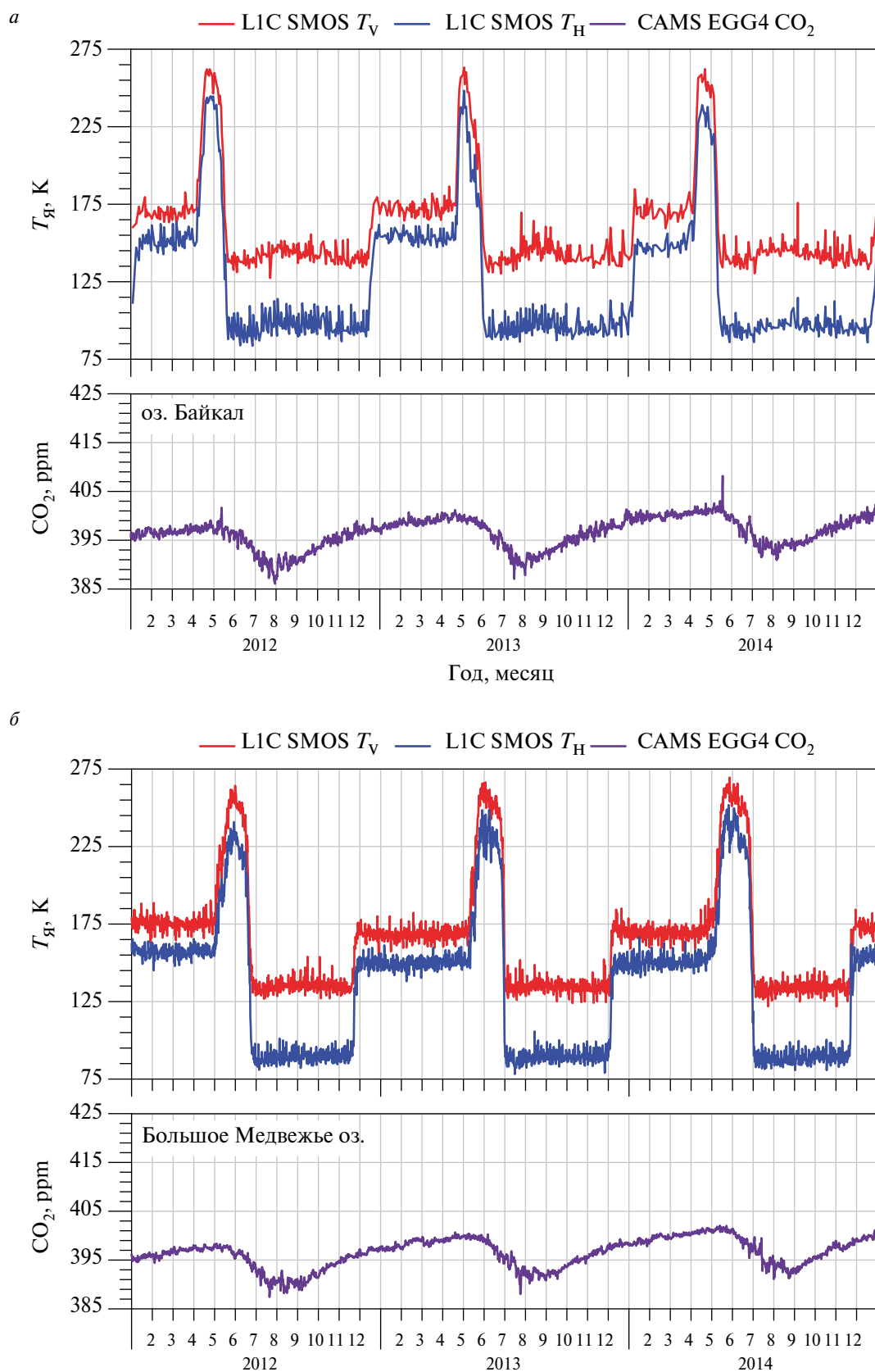


Рис. 5. Сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO₂ за трехлетний период: *a* – для оз. Байкал (бореальная зона); *b* – для оз. Большое Медвежье (субарктическая зона).

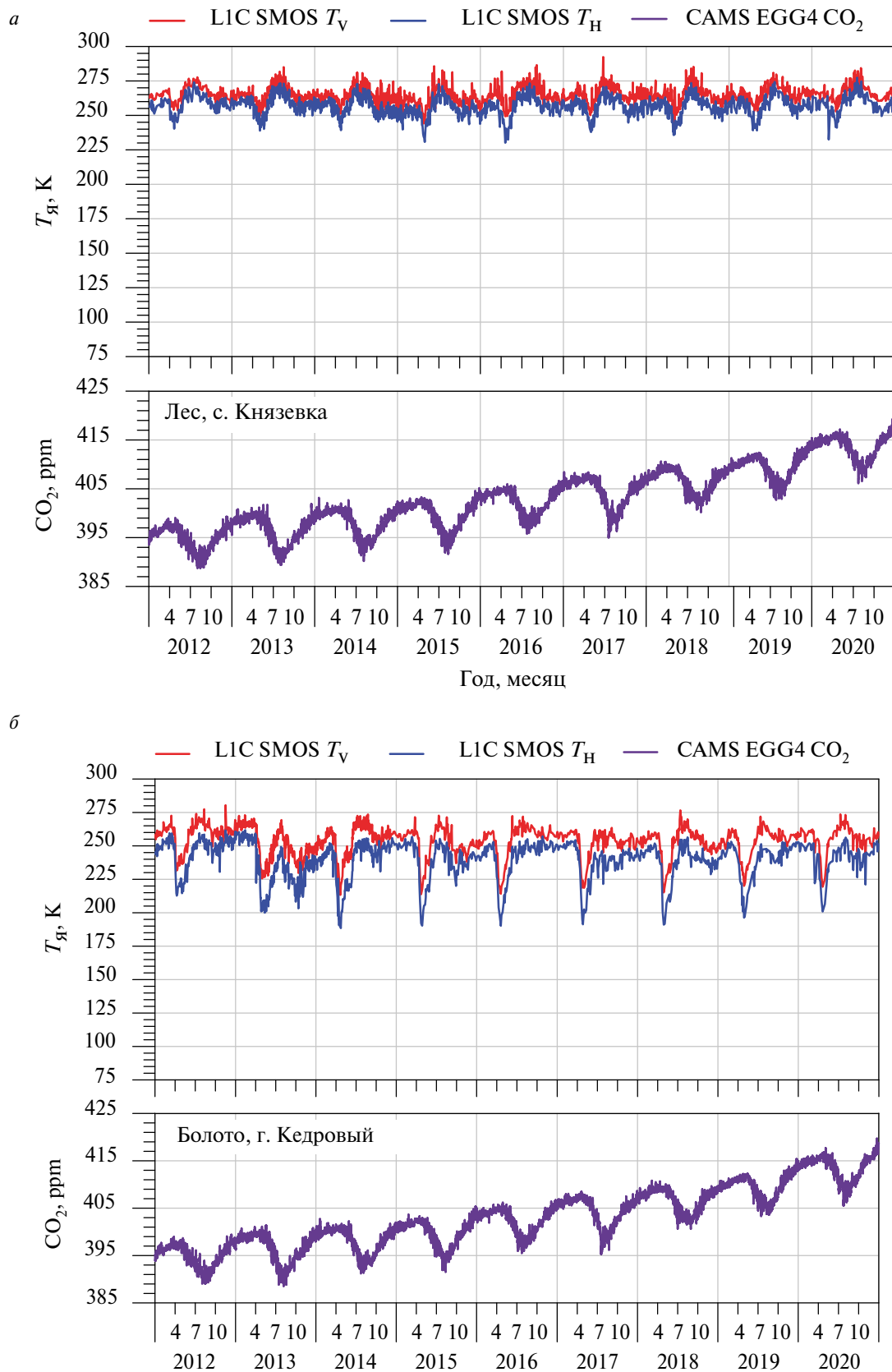


Рис. 6. Сезонная динамика яркостной температуры и концентрации CO_2 для двух тестовых участков с разным ландшафтом: *a* – лес; *b* – болото.

Таблица 2. Тестовые участки ландшафта и координаты центра ячеек L1C SMOS

Участок ландшафта	Населенный пункт, регион	Координаты
Лес	с. Князевка, Омская обл.	54.495° с.ш., 74.065° в.д.
Болото	г. Кедровый, Томская обл.	57.102° с.ш., 79.498° в.д.

приносящая летом 54 тыс. т растворенных минеральных соединений и 36 тыс. т взвешенных веществ. Рыбная продукция озера довольно разнообразна. Биомасса фитопланктона в озере зимой подо льдом чрезвычайно низкая, а летом возрастает от 130 до 340 мг/м³ (Румянцев и др., 2012). Таким образом, биопродуктивность Большого Невольничьего оз. значительно выше, чем Большого Медвежьего, что и показывают кратковременные выбросы углекислого газа в период разрушения ледяного покрова, которые присутствуют на сезонной зависимости концентрации CO₂ для первого озера (ср. рис. 4д и е). Для пресноводной части Обской губы отсутствие выбросов CO₂ в период разрушения ледяного покрова можно объяснить, во-первых, тем, что Обская губа расположена в холодной субарктической зоне в области вечной мерзлоты, а во-вторых, тем, что это эстуарий реки Обь, и даже в зимнее время существует значительный сток Оби, не позволяющий водной массе застаиваться подо льдом (Tikhonov et al., 2022).

В работе использовались данные реанализа CAMS EGG4 о концентрации CO₂ в столбе атмосферы над исследуемыми акваториями. Нас же интересовало сезонное изменение концентрации углекислого газа в приземном (приводном) слое атмосферы и связь его с фенологическими фазами водных объектов. Кратковременные выбросы CO₂ в период разрушения ледяного покрова у водных акваторий, находящихся в бореальной зоне, мы связали с накоплением углекислого газа за зимний период в водной толще подо льдом и в ледяном покрове и последующем выбросом его при весеннем разрушении льда. Однако такие кратковременные повышения концентрации CO₂ могут быть связаны с атмосферным переносом от территорий, имеющих другой ландшафт и значительно удаленных от рассматриваемых акваторий. Для доказательства того, что кратковременные выбросы CO₂ в период разрушения льда связаны именно с данными акваториями, была рассмотрена долговременная сезонная динамика концентрации углекислого газа и яркостной температуры двух тестовых участков, расположенных в бореальной зоне (см. рис. 6). Первый участок расположен в Омской обл. и полностью покрыт лесом, второй представляет собой обширную болотистую местность и находится в Томской обл. В табл. 2 указаны регионы и природные зоны, в которых расположены тестовые участки, а также координаты центра анализируемых ячеек L1C SMOS.

Анализ рис. 6 показал, что сезонные изменения T_y для тестовых участков сильно отличаются от сезонных значений яркостной температуры для пресноводных акваторий как по величине, так и по амплитуде изменений (ср. рис. 4 и 6). Максимальные значения T_y соответствуют середине лета и связаны с максимальным развитием растительности. Далее значения T_y уменьшаются, что обусловлено увяданием растительности и последующим замерзанием поверхности. В зимний период T_y немного увеличивается или остается постоянной. Минимум яркостной температуры соответствует периоду весеннего таяния, когда поверхность становится влажной, а растительность еще не начала развиваться. После минимума происходит резкий рост T_y , связанный с высыханием поверхности и быстрым развитием растительности (Романов и др., 2022). Различия в амплитуде сезонных изменений яркостной температуры для лесного и болотистого участка, особенно в весенний период, связано с большей увлажненностью второго участка, а также, вероятно, с появлением на нем небольших озер. Сезонные изменения концентрации CO₂ в столбе атмосферы над тестовыми участками так же, как и у пресноводных акваторий, носят циклический характер. Минимум концентрации углекислого газа приходится на летний период, соответствующий максимуму фотосинтеза, определяемому буйным развитием растительности. Максимум концентрации CO₂ приходится на весенний период, когда начинается период таяния (освобождения поверхности от снега и льда), а растительность еще не развивается. Кратковременных весенних выбросов CO₂, как у пресноводных акваторий бореальной зоны, на тестовых участках ни в один из сезонов не наблюдается, что становится косвенным доказательством связи этих выбросов с разрушением ледяного покрова пресноводных акваторий бореальной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты сравнения данных реанализа по концентрации углекислого газа в атмосфере и данных спутниковой микроволновой радиометрии для ряда крупных пресноводных акваторий Северного полушария, расположенных в бореальной и субарктической зоне, за период 2012–2020 гг. Данные спутниковой микроволновой радиометрии (спутник SMOS) были использованы

для определения фенологических фаз исследуемых водоемов: открытая водная поверхность, ледяной покров, разрушение ледяного покрова.

В работе мы стремились показать связь данных спутниковой микроволновой радиометрии, по которым можно отслеживать фенологические фазы крупных пресноводных акваторий бореальной и субарктической зоны, с динамикой концентрации CO₂ в столбе атмосферы над ними. Задача заключалась в том, чтобы продемонстрировать, что для всех подобных акваторий динамика концентрации CO₂ схожа, и максимум наблюдается в начале весеннего периода, когда разрушается ледяной покров у замерзающих озер или когда заканчивается холодный период (минимум биопродуктивности) для незамерзающих озер.

Полученные результаты и их анализ показали, что концентрация CO₂ в атмосфере над исследуемыми акваториями имеет сезонный циклический характер. Минимум концентрации соответствует летнему периоду из-за сильного фотосинтеза фитопланктона, в результате которого углекислый газ поглощается в воде. Максимум концентрации CO₂ над акваториями соответствует окончанию зимнего периода. Зимой из-за сильного понижения температуры воды резко уменьшается фотосинтез, что приводит к сильному уменьшению поглощения CO₂ в водной толще и, соответственно, увеличению его концентрации в воде и эмиссии из акваторий. Для замерзающих озер максимум концентрации CO₂ над акваториями соответствует периоду разрушения ледяного покрова, приводящего к высвобождению накопленного за зимний период углекислого газа, который “запечатан” во льду и в водной толще подо льдом. У замерзающих озер бореальной зоны иногда наблюдается еще и сильный кратковременный выброс углекислого газа, также соответствующий стадии разрушения ледяного покрова. Этот выброс объясняется более высокой биопродуктивностью водоемов бореальной зоны по сравнению с акваториями субарктической зоны.

В настоящей статье мы попытались кратко объяснить причины сезонной циклическости концентрации CO₂ в столбе атмосферы над акваториями, а также наличие или отсутствие кратковременного выброса CO₂ в период разрушения льда у ряда акваторий. Подробное исследование этих причин представляется темой для отдельной большой работы с привлечением многих специалистов, занимающихся исследованием озер, динамикой их вод, биопродуктивностью, физикой атмосферы и т.д. Такую глобальную задачу мы перед собой не ставили. Нам хотелось показать, что у всех подобных акваторий присутствует схожая динамика содержания CO₂ в атмосфере и связана она с фенологическими фазами этих акваторий.

Выполнить контактные измерения сезонной динамики концентрации углекислого газа в атмосфере для всех акваторий субарктической и бореальной зоны практически невозможно. Однако для крупных акваторий можно использовать информацию со спутника SMOS. Таким образом, данные спутниковой микроволновой радиометрии могут быть использованы для косвенной оценки сезонного изменения концентрации CO₂ в атмосфере над крупными пресноводными акваториями бореальной и субарктической зоны.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке темы “Эмиссия” (гос. регистрация № 122101700045-7), темы “Космос-2” (гос. регистрация № 075-01133-22-00), темы “Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг” (госзадание № 0306-2021-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Войнов Г.Н., Налимов Ю.В., Пискун А.А., Становой В.В., Усанкина Г.Е. Основные черты гидрологического режима Обской и Тазовской губ (лед, уровни, структура вод). СПб.: Нестор-История, 2017. 192 с.
- Каретников С.Г. Проявление климатических изменений в ледовом режиме Ладожского озера за последние 55 лет // Лед и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 241–247. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020085>.
- Романов А.Н., Хвостов И.В., Тихонов В.В., Шарков Е.А. Оценка гидрологических изменений водно-болотных угодий российской Арктики, Субарктики и северной тайги по данным микроволнового дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 4. С. 12–24. DOI: 10.31857/S020596142204008X.
- Румянцев В.А., Дракובה В.Г., Измайлова А.В. Великие озера мира. СПб.: Лема, 2012. 370 с.
- Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 6. С. 46–53. DOI: 10.7868/S0205961417060045.
- Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Алексеева Т.А., Сеницкий А.И., Тихонова М.В., Шарков Е.А., Комарова Н.Ю. Межгодовые вариации собственного микроволнового излучения Обской губы в период ледостава и их связь с гидрологическими и климатическими изменениями региона // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 185–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199.
- Denfeld B.A., Wallin M.B., Sahlée E., Sobek S., Kokic J., Chmiel H.E., Weyhenmeyer G.A. Temporal and spatial carbon dioxide concentration patterns in a small boreal lake in relation to ice-cover dynamics // Boreal Environment Research. 2015. V. 20. No. 6. P. 679–692.
- Denfeld B.A., Kortelainen P., Rantakari M., Sobek S., Weyhenmeyer G.A. Regional Variability and Drivers of Below Ice CO₂ in Boreal and Subarctic Lakes // Ecosystems. 2016. V. 19. P. 461–476. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9944-z>.

- Engel F., Farrell K.J., McCullough I.M., Scordo F., Denfeld B.A., Dugan H.A., de Eyto E., et al. A lake classification concept for a more accurate global estimate of the dissolved inorganic carbon export from terrestrial ecosystems to inland waters // *The Science of Nature*. 2018. V. 105. Art. No. 25. 9 p. DOI: 10.1007/s00114-018-1547-z.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. Lisboa: DEIMOS Engenharia, 2017. 83 p.
- Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J.J., et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. V. 19. No. 6. P. 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.
- Karlsson J., Giesler R., Persson J., Lundin E. High emission of carbon dioxide and methane during ice thaw in high latitude lakes // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. No. 6. P. 1123–1127. DOI: 10.1002/grl.50152.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
- Rantala M.V., Nevalainen L., Rautio M., Galkin A., Luoto T.P. Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline // *Biogeochemistry*. 2016. No. 129. P. 235–253. DOI: 10.1007/s10533-016-0229-1.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. No. 2. P. 121–134.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>.
- Tikhonov V.V., Romanov A.N., Khvostov I.V., Alekseeva T.A., Sinit-skiy A.I., Tikhonova M.V., Sharkov E.A., Komarova N. Yu. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // *Российская Арктика (Russian Arctic)*. 2022. № 2(17). P. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.
- Tranvik L.J., Downing J.A., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore Th.J., Dillon P., Finlay K., et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.
- Wen Z., Shang Y., Lyu L., Li S., Tao H., Song K. A Review of Quantifying $p\text{CO}_2$ in Inland Waters with a Global Perspective: Challenges and Prospects of Implementing Remote Sensing Technology // *Remote Sensing*. 2021. V. 23. No. 13. Art. No. 4916. 15 p. <https://doi.org/10.3390/rs13234916>.
- Weyhenmeyer G.A., Karlsson J. Nonlinear response of dissolved organic carbon concentrations in boreal lakes to increasing temperatures // *Limnology and Oceanography*. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2513–2519. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2513.
- Weyhenmeyer G.A., Kosten S., Wallin M.B., Tranvik L.J., Jeppesen E., Roland F. Significant fraction of CO_2 emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8. Iss. 12. P. 933–938. <https://doi.org/10.1038/ngeo2582>.
- Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin F.S. Permafrost and the global carbon budget // *Science*. 2006. V. 312. P. 1612–1613. DOI: 10.1126/SCIENCE.1128908.

Relation of Changes in CO_2 Concentration over Large Water Areas of the Boreal and Subarctic Zones of the Northern Hemisphere with Their Phenological Phases Determined from SMOS Satellite Data

V. V. Tikhonov^{1,2}, E. V. Pashinov¹, D. M. Ermakov^{1,3}, I. V. Khvostov², A. N. Romanov²

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

²Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

³Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia

The paper presents the results of comparing the atmospheric carbon dioxide reanalysis data and phenological phases of large freshwater areas located in the boreal and subarctic zone for 2012–2020. The data from the CAMS global greenhouse gas reanalysis, which are three-dimensional fields of aerosols and chemical constituents in the atmosphere, with full coverage of the globe, were used in this work. The data used in this study were the average CO_2 content in the air column over the water areas. The phenological phases of freshwater bodies (water surface, ice cover, ice destruction) were determined using data from the MIRAS microwave radiometer of the SMOS satellite. The comparison and analysis showed that the CO_2 concentration in the atmosphere over the studied water areas has a seasonal cyclic character. The minimum concentration corresponds to the summer period due to strong photosynthesis in water areas, as a result of which carbon dioxide is absorbed in the water column. The maximum concentration of CO_2 over water areas corresponds to the period of destruction of the ice cover, leading to the release of carbon dioxide accumulated during the winter period, which is “sealed” in the ice and in the water column under the ice. In freezing lakes located in the boreal zone, in addition to the stable spring CO_2 maximum, a strong short-term release of carbon dioxide is sometimes observed, also corresponding to the stage of ice cover destruction. This emission is explained by the higher bioproductivity of water bodies in the boreal zone compared to water areas in the subarctic zone.

Keywords: large water areas, phenological phases, boreal and subarctic zone, carbon dioxide, satellite microwave radiometry, ice cover

REFERENCES

- Voykov G. N., Nalimov Yu. V., Piskun A. A., Stanovoy V. V., Usankina G. E. Osnovnye cherty gidrologicheskogo rezhima Obskoi i Tazovskoi gub (led, urovni, struktura vod) [The main features of the hydrological regime of the Ob and Taz bays (ice, levels, water structure)]. Saint Petersburg: Nestor-History, 2017. 192 p. (In Russian).
- Karetnikov S. G. Proyavlenie klimaticheskikh izmenenii v ledovom rezhime Ladozhskogo ozera za poslednie 55 let [Manifestation of climatic change in the ice phenology of Lake Ladoga over the past 55 years] // Ice and Snow, 2021. V. 61. No. 2. P. 241–247. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020085>. (In Russian).
- Romanov A. N., Khvostov I. V., Tikhonov V. V., Sharkov E. A. Assessing Hydrological Changes in Wetland Areas of the Russian Arctic, Subarctic, and Northern Taiga Based on Microwave Remote Sensing Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. No. 9. P. 1100–1110. DOI: 10.1134/S0001433822090201.
- Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. Velikie ozera mira [Great Lakes of the World], Saint Petersburg: Lema, 2012. 370 p. (In Russian).
- Tikhonov V. V., Khvostov I. V., Romanov A. N., Sharkov E. A. Analysis of Changes in the Ice Cover of Freshwater Lakes by SMOS data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2018. V. 54. No. 9. P. 1135–1140. <https://doi.org/10.1134/S0001433818090384>.
- Tikhonov V. V., Romanov A. N., Khvostov I. V., Alekseeva T. A., Sinitskiy A. I., Tikhonova M. V., Sharkov E. A., Komarova N. Yu. Mezhdodovye variatsii sobstvennogo mikrovolnovogo izlucheniya Obskoi guby v period ledostava i ikh svyaz' s gidrologicheskimi i klimaticheskimi izmeneniyami regiona [Interannual variation of microwave radiation of the Gulf of Ob during the freezing season and relationship to hydrological and climate changes in the region] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2021. V. 18. No. 6. P. 185–199. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-185-199. (In Russian).
- Denfeld B. A., Wallin M. B., Sahlée E., Sobek S., Kokic J., Chmiel H. E., Weyhenmeyer G. A. Temporal and spatial carbon dioxide concentration patterns in a small boreal lake in relation to ice-cover dynamics // Boreal Environment Research. 2015. V. 20. No. 6. P. 679–692.
- Denfeld B. A., Kortelainen P., Rantakari M., Sobek S., Weyhenmeyer G. A. Regional Variability and Drivers of Below Ice CO₂ in Boreal and Subarctic Lakes // Ecosystems. 2016. V. 19. P. 461–476. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9944-z>.
- Engel F., Farrell K. J., McCullough I. M., Scordo F., Denfeld B. A., Dugan H. A., de Eyto E., et al. A lake classification concept for a more accurate global estimate of the dissolved inorganic carbon export from terrestrial ecosystems to inland waters // The Science of Nature. 2018. V. 105. Art. No. 25. 9 p. DOI: 10.1007/s00114-018-1547-z.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P., Lopes G., Barbosa J. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model, Lisboa: DEIMOS Engenharia, 2017. 83 p.
- Inness A., Ades M., Agustí-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J. J., et al. The CAMS reanalysis of atmospheric composition // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. No. 6. P. 3515–3556. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.
- Karlsson J., Giesler R., Persson J., Lundin E. High emission of carbon dioxide and methane during ice thaw in high latitude lakes // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 6. P. 1123–1127. DOI: 10.1002/grl.50152.
- Kerr Y. H., Waldeufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.-J., et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // Proceeding of the IEEE. 2010. V. 98. No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
- Rantala M. V., Nevalainen L., Rautio M., Galkin A., Luoto T. P. Sources and controls of organic carbon in lakes across the subarctic treeline // Biogeochemistry. 2016. No. 129. P. 235–253. DOI: 10.1007/s10533-016-0229-1.
- Sahr K., White D., Kimerling A. J. Geodesic Discrete Global Grid System // Cartography and Geographic Information Science. 2003. V. 30. No. 2. P. 121–134.
- Tikhonov V., Khvostov I., Romanov A., Sharkov E. Theoretical study of ice cover phenology at large freshwater lakes based on SMOS MIRAS data // The Cryosphere. 2018. V. 12. No. 8. P. 2727–2740. <https://doi.org/10.5194/tc-12-2727-2018>.
- Tikhonov V. V., Romanov A. N., Khvostov I. V., Alekseeva T. A., Sinitskiy A. I., Tikhonova M. V., Sharkov E. A., Komarova N. Yu. Analysis of the hydrological regime of the Gulf of Ob in the freezing period using SMOS data // Russian Arctic. 2022. No. 2(17). P. 44–71. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-44-71.
- Tranvik L. J., Downing J. A., Loiselle S. A., Striegl R. G., Ballatore Th. J., Dillon P., Finlay K., et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnology and Oceanography. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2298–2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.
- Wen Z., Shang Y., Lyu L., Li S., Tao H., Song K. A Review of Quantifying pCO₂ in Inland Waters with a Global Perspective: Challenges and Prospects of Implementing Remote Sensing Technology // Remote Sensing. 2021. V. 23. No. 13. Art. No. 4916. 15 p. <https://doi.org/10.3390/rs13234916>.
- Weyhenmeyer G. A., Karlsson J. Nonlinear response of dissolved organic carbon concentrations in boreal lakes to increasing temperatures // Limnology and Oceanography. 2009. V. 54. No. 6. Pt. 2. P. 2513–2519. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2513.
- Weyhenmeyer G. A., Kosten S., Wallin M. B., Tranvik L. J., Jeppesen E., Roland F. Significant fraction of CO₂ emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs // Nature Geoscience. 2015. V. 8. Iss. 12. P. 933–938. <https://doi.org/10.1038/ngeo2582>.
- Zimov S. A., Schuur E. A. G., Chapin F. S. Permafrost and the global carbon budget // Science. 2006. V. 312. P. 1612–1613. DOI: 10.1126/SCIENCE.1128908.