

Спутниковая гравиметрия в исследованиях таяния мерзлоты и продуктивности растительности криолитозоны

В. И. ХАРУК^{1, 2, 3*}, А. С. ГОЛЮКОВ^{1, 2, 3}, М. Л. ДВИНСКАЯ^{1, 3}, С. Т. ИМ^{1, 2, 3, 4},
И. А. ПЕТРОВ^{1, 2, 3}, Е. Г. ШВЕЦОВ^{1, 3}

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

²Томский государственный университет
634050, Томск, ул. Ленина, 36

³Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

⁴Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева
660014, Красноярск, ул. Красноярский рабочий, 31

*E-mail: v7sib@mail.ru

Статья поступила 03.07.2024

После доработки 10.07.2024

Принята к печати 15.07.2024

АННОТАЦИЯ

Изменения гидротермического режима почвогрунтов, обусловленные таянием мерзлотного слоя, представляют важнейший экологический фактор динамики растительного покрова в криолитозоне. Исследовалось воздействие таяния почвогрунтов на индекс прироста (ИП) лиственницы (*Larix spp.*) и на валовую и чистую первичную продуктивность (GPP, NPP) растительности Заполярья Средней Сибири (редколесья, тундра и лесотундра). Проверялись гипотезы: 1) данные гравиметрии позволяют оценить динамику водной массы в почвогрунтах; 2) таяние мерзлотных почвогрунтов стимулирует прирост древесных растений и продуктивность растительного покрова. В работе использованы методы дендрохронологии, данные полевых работ, спутниковой гравиметрии (съемка GRACE) и дистанционной оценки GPP (съемка Terra/MODIS). Анализ данных гравиметрии выявил значимый многолетний тренд снижения водной массы в почвогрунтах криолитозоны ($R^2 = 0,68$). Величина стока высвобождаемой при таянии воды оценивается в $6,4 \pm 2,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ в год. Установлена тесная связь ИП лиственницы и GPP с аномалиями влажности в почвогрунтах ($r = -0,7$ и $r = -0,9$ соответственно). Возрастающая температура корнеобитаемого слоя и дефицит влажности водяного пара также положительно влияют на ИП лиственницы и величину GPP растительности в целом ($r = 0,6$ и $r = 0,6 \dots 0,9$ соответственно). Установлено, что пирогенные потери углерода значительно (на два порядка) ниже величины NPP. В условиях переувлажнения почвогрунтов, типичного для Арктики, потепление климата сопровождается улучшением гидротермического режима произрастания растительного покрова, способствует возрастанию продуктивности растительности и сохранению криолитозоной статуса территории стока углерода.

Ключевые слова: таяние мерзлоты, лесотундра, GRACE, гравиметрия, криолитозона, северные лиственничники, продуктивность лесотундры.

ВВЕДЕНИЕ

Территория многолетнемерзлых почвогрунтов, криолитозона, играет важную роль в глобальных изменениях климата и в функционировании северных экосистем. Температура верхнего слоя мерзлотных почвогрунтов и динамика активного слоя представляют ключевые климатические переменные, отображающие различные факторы среды обитания растений в Арктике [Anisimov et al., 2013; Romanovsky et al., 2017].

В Сибири возрастание температуры воздуха в высоких широтах, вчетверо превышающее средние значения по планете, влечет значимые изменения гидрологического и термического режимов произрастания древесных растений и растительного покрова в целом [Liljedahl et al., 2016; Nitzbon et al., 2020; Hu et al., 2021; Rantanen et al., 2022]. Таяние многолетнемерзлых почвогрунтов наряду с повышением температуры воздуха представляет важнейший фактор динамики растительности криолитозоны. Наблюдается возрастание глубины корнеобитаемой зоны, увеличивается доступность биогенных элементов, повышается температура почвогрунтов, в целом улучшается гидротермический режим почв. Таяние мерзлоты служит дополнительным источником влаги в период сезонного водного стресса, а также в высокогорьях на южной границе криолитозоны [Zhang et al., 2016]. Повышение температуры воздуха на 1 °C, согласно прогностическим оценкам, может повлечь снижение на 25 % объема вечной мерзлоты в верхнем 3-метровом слое почвогрунтов [Fox-Kemper et al., 2021]. Наряду с постепенным таянием таяние обогащенных льдом почвогрунтов сопровождается термокарстом, включая образование водоемов. Вместе с тем, несмотря на документированное таяние мерзлотного слоя, в ряде частей криолитозоны, включая Северо-Восточную Арктику, почвогрунты с большим содержанием льда и органики, согласно прогнозам, останутся стабильными и после 2100 г., даже при реализации наиболее пессимистических сценариев потепления климата [Nitzbon, 2020].

Потепление климата в высоких широтах сопровождается возрастанием продуктивности растительного покрова, включая феномен “зеленения” тундры [Heijmans et al., 2022; Kharuk et al., 2023c]. В то же время в Аркти-

ке происходит увеличение частоты, площади и интенсивности пожаров [Kharuk et al., 2022]. В целом таяние мерзлотного слоя рассматривается как важнейший экологический фактор, определяющий динамику растительного покрова криолитозоны [Heijmans et al., 2022].

Оценки влияния потепления климата на таяние мерзлоты и влажность почвогрунтов основаны преимущественно на данных наземных измерений, а также материалах микроволнового спутникового зондирования. Наряду с этим рассматриваются возможности применения в этих целях гравиметрической съемки, выполняемой спутниками серии GRACE. Гравиметрия чувствительна ко всем факторам, влияющим на локальные аномалии массы земной поверхности, включая аномалии водной массы. Наиболее значимые применения спутниковой гравиметрии связаны с исследованиями в области гляциологии, в оценках динамики таяния ледников Гренландии и Антарктики [Barletta et al., 2013; Wang et al., 2023]. Имеются указания на применимость гравиметрии в оценке воздействия потепления климата на гидрологический режим почвогрунтов и рост древесных растений (*Larix* spp.) [Kharuk et al., 2023a, с].

Географически влияние таяния мерзлоты на растительность исследуется преимущественно в западной части криолитозоны Северной Америки, тогда как обширные территории в Сибири и Канаде слабо изучены [Heijmans et al., 2022].

В данной работе изучается воздействие таяния многолетнемерзлых почвогрунтов на растительный покров северной части Средней Сибири. Проверяются следующие гипотезы: 1) материалы спутниковой гравиметрии применимы в анализе динамики таяния мерзлотного слоя и гидрологического режима почвогрунтов криолитозоны; 2) таяние мерзлотного слоя, обусловленное потеплением климата, способствует возрастанию прироста деревьев лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb., *L. gmelini* (Rupr.) Kuzen.), основной лесообразующей породы в криолитозоне, а также возрастанию первичной валовой (GPP) и чистой (NPP) продуктивности растительного покрова.

Цель работы: 1) оценка динамики таяния почвогрунтов криолитозоны севера Средней Сибири, 2) анализ влияния таяния мерзлоты на индекс прироста деревьев лиственницы

и на валовую (GPP) и чистую (NPP) первичную продуктивность растительного покрова.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследуемая территория (“арктический сектор”) включает лесные, лесотундровые и тундровые сообщества криолитозоны Заполярья Средней Сибири и расположена преимущественно в зоне сплошной мерзлоты (рис. 1).

Климат района суровый, субарктический и резко-континентальный. Характерны долгие зимы и короткие летние периоды. Часто наблюдаются циклоны и антициклоны. Полярная ночь с морозами и пургой, а полярный день с сильной инсоляцией. Типичны также пасмурная погода и затяжные моросящие дожди. В течение года осадки распределяются крайне неравномерно; большая их часть выпадает с конца мая до конца сентября. Устойчивый снежный покров ложится в третью декаде сентября и сходит в первой половине июня. Высота снежного покрова на возвышенностях колеблется в пределах 0,4–0,8 м, а у подножий гор и в равнинной части тер-

ритории может достигать 8–9 м. Многолетняя мерзлота имеет мощность до 1 км. Под руслами крупных рек развиты талики. В летнее время образуется деятельный слой мощностью до 2 м. Глубина сезонного промерзания грунта зависит от экспозиции склона, растительного покрова, увлажненности и типа грунта. Для равнинных тундровых ландшафтов характерны многоводность, маломощность почв, морские и аккумулятивные отложения, полигонально-валиковые болота, байджарахи. На Таймыре отмечено самое северное распространение древесно-кустарниковой растительности [Матвеева, 1998; Якушкин и др., 2012]. Древесная растительность в лесотундре, редколесьях и сомкнутых лесах представлена лиственницей (*Larix gmelinii*, *L. sibirica*), а также береской (*Betula* spp.). В древостоях юго-западной части сектора имеется примесь кедра (*Pinus sibirica* Du Tour) и ели (*Picea obovata* Ledeb.).

Методы исследования, использованные в работе, включали материалы спутниковой гравиметрии, данные экспедиционных исследований, дендрохронологический анализ ра-

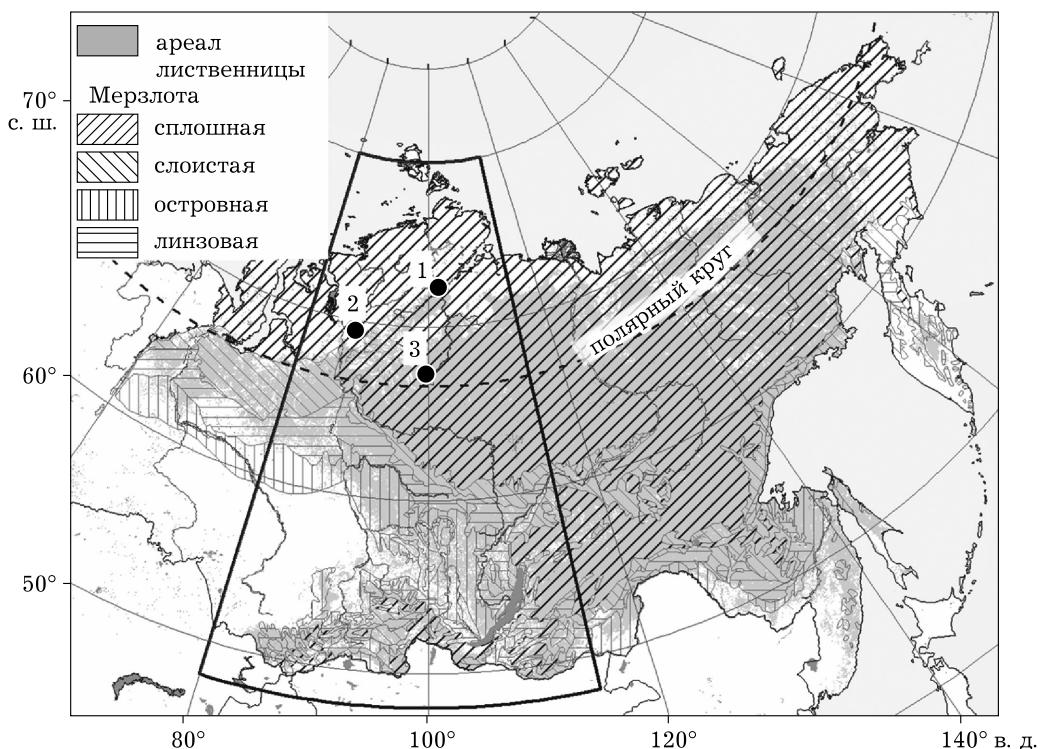


Рис. 1. Исследуемая территория ограничена с юга полярным кругом. 1, 2, 3 – ключевые участки “Ары-Мас”, “Пясина” и “Котуй” соответственно

диального прироста деревьев лиственницы, а также оценки величин валовой (GPP) и чистой (NPP) первичной продуктивности растительного покрова, полученные на основе спутниковой съемки MODIS.

Данные спутниковой съемки GRACE и MODIS. Использованные в анализе материалы гравиметрии, выполненной спутниками GRACE и GRACE-FO, получены из следующей базы данных: (<https://podaac-opendap.jpl.nasa.gov/opendap/hyrax/allData/tellus/>). Период: 2002–2022 гг., временное разрешение – один месяц. Данные гравиметрии содержат информацию о всех аномалиях массы в пределах поля зрения прибора ($1^\circ \times 1^\circ$), включая водный эквивалент массы (в метрах) по всей глубине влагосодержания.

В целом аномалии гравиметрической массы в секторе обусловлены преимущественно динамикой водной массы. Далее в тексте наряду с терминами “аномалии массы” и “аномалии общей массы” используются также, где это не нарушает логики изложения, термины “водная масса, относительные единицы” и “влажность почвогрунтов, относительные единицы”, поскольку последняя тесно связана с водной массой.

Данные гравиметрии рассчитывались за гидрологический год – с октября предыдущего по сентябрь включительно текущего года, поскольку в течение вегетационного периода на рост деревьев и растительного покрова в целом влияет влага, накопленная за весь холодный период [Kharuk et al., 2023b].

Динамика GPP и NPP рассчитана на основе [Running, Zhao, 2021] и баз данных [<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2H.061>; <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.06>].

При картировании пожаров использована геопространственная база данных, сформированная в Институте леса СО РАН. В базе данных используются спутниковые данные, полученные с платформ NOAA/AVHRR, TERRA/AQUA/MODIS и SNPP/NOAA-20/VIIRS. Для исключения тепловых аномалий антропогенного происхождения использовались данные локализации населенных пунктов (Open Street Map, <https://www.openstreetmap.org/>). Используя данные высокого разрешения Google Earth, из анализа были исключены тепловые аномалии, связанные с нефтегазовыми месторождениями.

Методика расчета стока воды, высвобождаемой при таянии почвогрунтов. Методика расчета таяния мерзлотного слоя включала два этапа. Вначале рассчитывалась разница в величинах аномалий гравиметрической массы (ΔG_m) в начале (средние величины за 2007–2009 гг.) и конце (средние величины за 2020–2022 гг.) анализируемого периода:

$$\Delta G_m = G_{m(2007-2009)} - G_{m(2020-2022)}, \quad (1)$$

где $G_{m(2007-2009)}$ и $G_{m(2020-2022)}$ – средние величины G_m за периоды 2007–2009 и 2020–2022 гг. соответственно. Выбор первого года в расчетах (2007) обусловлен тем, что с этой даты начинается тренд снижения аномалий массы (рис. 2, а).

Основным компонентом, определяющим динамику массы в пределах исследуемой территории, является масса воды (в твердом и жидким состояниях). Наряду с потерями гравиметрической массы из-за стока талой воды происходило ее возрастание вследствие увеличения NPP. В этой связи в данные гравиметрии внесены поправки на величину NPP с учетом коэффициента биогенного разложения (k) ее части. Существующие оценки величины k для условий криолитозоны малочисленны. В анализе использована величина $k = 0,9$, определенная по данным в статье [Camill et al., 2001], в которой ежегодная деструкция биомассы оценивается величиной менее 10 %.

Вместе с тем в криолитозоне наблюдается возрастание частоты, площади и интенсивности пожаров [Kharuk et al., 2022]. Пирогенные эмиссии углерода оценивались на основании ранее опубликованных данных. В случае лиственничных древостоев Севера Сибири оценки эмиссий варьировались от 3 до 3,44 кг С·м⁻² [Цветков, 2006; Delcourt et al., 2021; Veraverbeke et al., 2021]. Итоговая оценка эмиссий углерода выполнялась исходя из данных Цветкова [2006], поскольку указанные данные были получены именно в исследуемом секторе. Для оценки пирогенных эмиссий в тундре использовалось значение 1,13 кг С·м⁻², полученное в исследованиях на северо-востоке Сибири [Webb et al., 2024].

С учетом указанных поправок сток талой воды вычислялся по формуле

$$\Delta S = \Delta G_m + k \Sigma NPP - \Sigma F, \quad (2)$$

где ΔS – водный сток; ΣNPP и ΣF – производная биомасса и потери углерода при

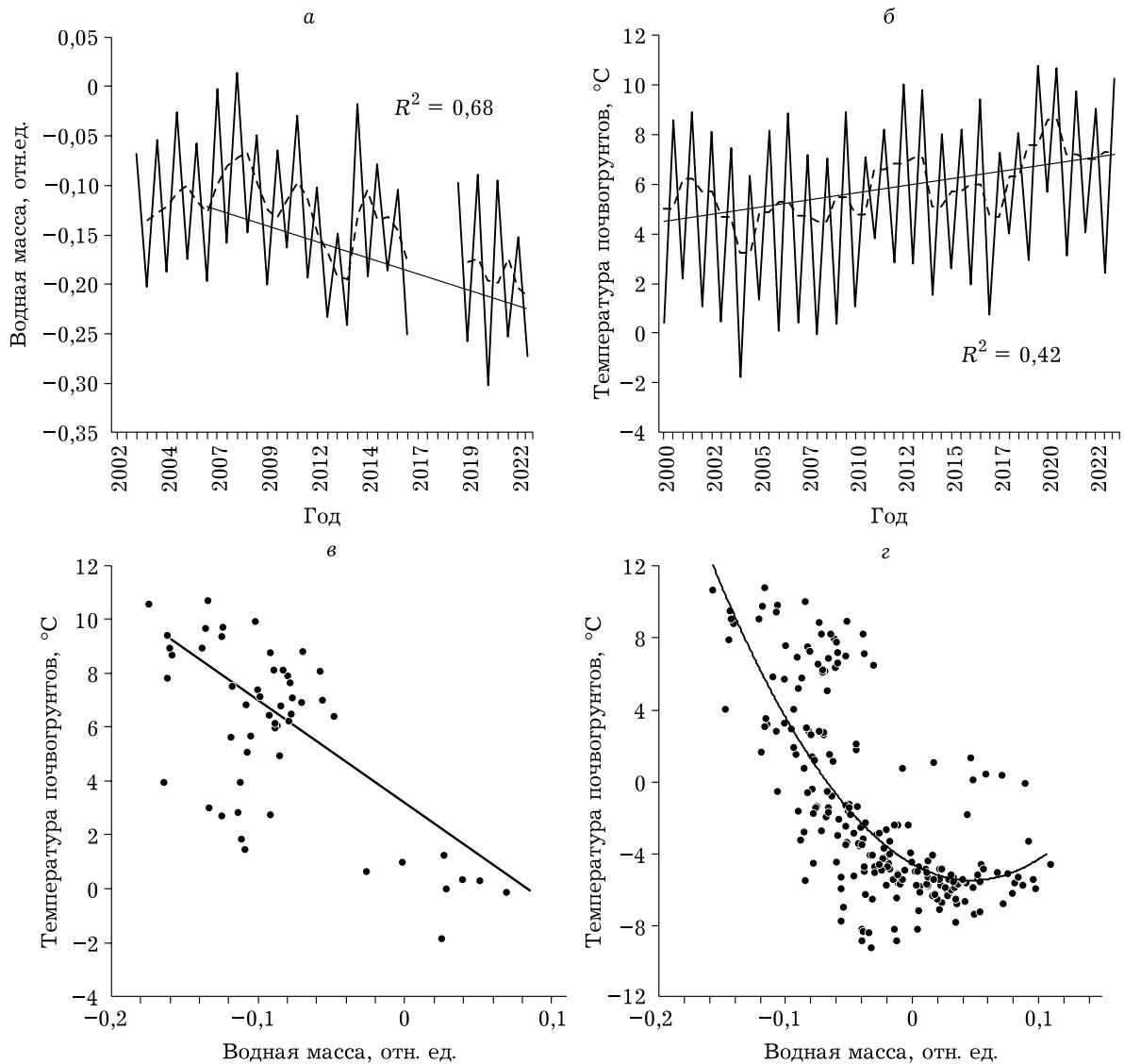


Рис. 2. Снижение среднегодовых и средних летних аномалий водной массы в криолитозоне. Максимумы соответствуют годовым значениям (январь – декабрь), минимумы – средним летним (ИИА). Данные включают поправку на НПР (а). Повышение средней летней температуры почвогрунтов (слой 0–100 см) (б). Штриховыми линиями на а и б обозначены средние значения. Зависимость температуры почвогрунтов от среднелетних (в) ($r = -0,48$) и среднегодовых (г) ($r = -0,71$) аномалий водной массы ($p < 0,005$). Максимумы и минимумы соответствуют максимальным и минимальным летним температурам

пожарах соответственно за период 2007–2022 гг; k – “коэффициент сохранности” биомассы, учитывающий скорость ее деструкции. В целях уменьшения ошибок величины стока водной массы из анализа исключены территории крупных водных поверхностей (озера, водохранилища). Методика расчетов ΔS включала следующие этапы: генерирование на исследуемую территорию картосхем (1) ΔG_m , (2) $\sum NPP$ и $\sum F$, (3) картосхемы ΔS и (4) статистический анализ. Раstry преобразовывались

к условному разрешению 30 км методом билинейной интерполяции и представлялись в равновеликой конической проекции Алберса.

Следует отметить, что наряду с данными гравиметрии в расчетах стока талой воды можно было использовать так называемые “замкнутые” по водному балансу уравнения [Gronevold et al., 2020; Cao et al., 2021; Bongiannini et al., 2022], учитывающие величины годовых осадков, испарения и стока. Однако указанный подход связан со значительными

ошибками из-за неточности исходных переменных, представленных в современных базах данных, например в ERA5-Land [Muñoz-Sabater, 2021].

Данные дендрохронологии. Дендрохронологический анализ проводился на трех ключевых участках: “Ары Mac” (три пробные площади, 60 модельных деревьев); “Котуй” (две пробные площади, 66 модельных деревьев) и “Пясина” (10 пробных площадей, 242 модельных дерева) (см. рис. 1). Измерения образцов древесины проводились на платформе LINTAB 6 с точностью 0,01 мм [Rinn, 1996]. В результате получены временные ряды радиального прироста для каждого дерева (в мм). Для проверки качества датировки использовались программы TSAP и COFECHA [Holmes, 1983]. Для устранения возрастного тренда применялась процедура детрендирования, которая преобразует временные ряды ширины годичных колец к временным рядам безразмерных индексов со средним значением 1,0 и относительно постоянной дисперсией [Speer, 2010]. Для получения индексированных обобщенных древесно-кольцевых хронологий на ключевых участках древесно-кольцевые хронологии отдельных деревьев усреднялись. Для каждого ключевого участка была построена индексированная древесно-кольцевая хронология в программе ARSTAN; детрендирование осуществлялось линейной регрессией или отрицательной экспоненциальной кривой [Cook, Kairiukstis, 1990].

Климатические переменные. Величины температуры воздуха и почвогрунтов (на глубине 0–100 см), осадков и VPD (дефицит водяного пара) взяты из базы данных ERA5-Land (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset>). Данные представлены с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ и ежемесячным временным, период 2000–2022 гг. Температура почвогрунтов рассматривалась для слоя 0–100 см, поскольку в указанном интервале преимущественно локализована корнеобитаемая зона. Значения VPD были рассчитаны с помощью функции DewtoVPD, пакет R plantecophys на основе температуры точки росы, воздуха и барометрического давления на поверхности [Duursma, 2015].

Статистический анализ. Использовалось программное обеспечение StatSoft Statistica (<http://statsoft.ru>), (<https://www.r-project.org>)

и R-Studio (<https://posit.co/download/rstudio-desktop/>). Корреляционные зависимости рассчитывались по статистикам Пирсона и Спирмена. Значимости коэффициентов корреляций и уравнений регрессии оценивались с помощью *t*- и *F*-критерия. При создании картосхем трендов продуктивности (GPP) и климатических переменных применялся непараметрический метод Тейла – Сена подгонки линии тренда к точкам выборки путем выбора медианы наклонов всех линий через пары точек [Sen, 1968]. Тренды рассчитывались с использованием библиотеки Python rutmankendall 1.4.2 (<https://pypi.org/project/rutmankendall> по состоянию на 6 февраля 2023 г.), импортированной в ESRI ArcGIS. Desktop 10.8.1 (<https://www.esri-cis.com/ru-ru/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>). В результате сгенерированы наборы растровых картосхем трендов и оценены *p*-уровни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика влажности почвогрунтов и продуктивности растительного покрова

В криолитозоне начиная с 2006–2007 гг. наблюдается значимый тренд снижения средней за летней период (ИИА) водной массы в почвогрунтах, в то время как температура почвогрунтов повышается (рис. 2, *a*, *b*).

Температура почвы связана корреляционными зависимостями с водной массой как в летний период, так и в течение всего года (рис. 2, *c*, *g*). В последнем случае связь более тесная, поскольку снежный покров представляет термоизолятор, способствующий повышению среднегодовой температуры почв. Температура почв, как известно, тесно связана с температурой воздуха. Вместе с тем переувлажнение замедляет прогревание почвы вследствие высокой теплоемкости воды.

Снижение водной массы и повышение температуры почвогрунтов сопровождаются возрастанием GPP растительного покрова (рис. 3, *a*). Примечательно, что даты возникновения значимых трендов (возрастающих для GPP и снижающихся для водной массы) синхронизированы (2007 г.).

Величина GPP связана тесной негативной корреляционной зависимостью с водной массой в почвогрунтах (рис. 3, *b*). В целом по ар-

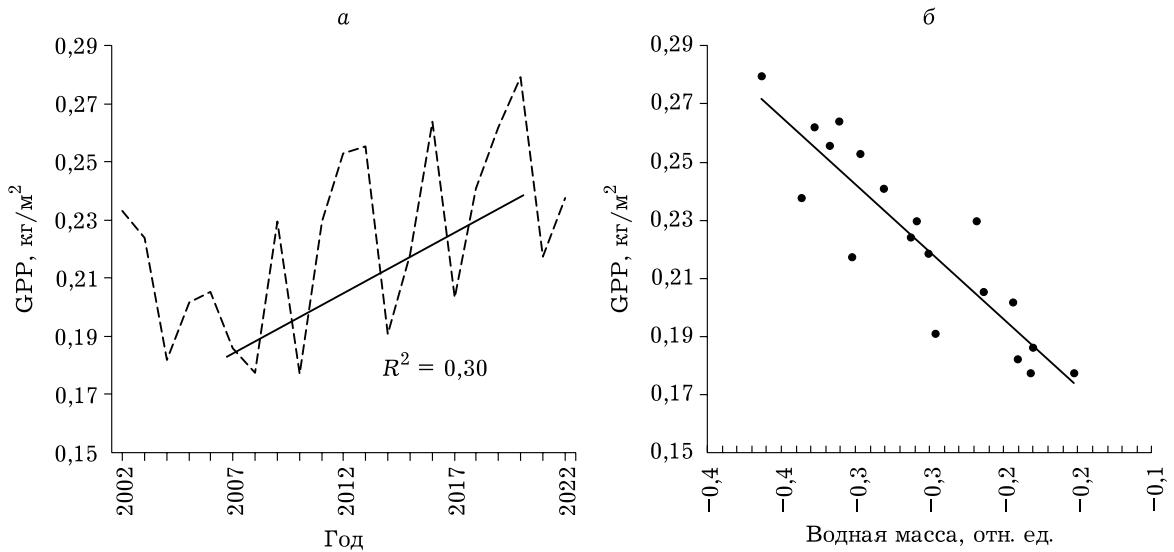


Рис. 3. Динамика средней (по арктическому сектору) валовой первичной продуктивности (GPP). Наблюдаются возрастающий тренд GPP ($p < 0,05$) (а). Величина GPP (средняя по сектору) связана тесной обратной корреляционной связью с водной массой в почвогрунтах (2003–2022 гг.; $r = -0,67$; $p < 0,001$) (б)

ктическому сектору возрастающие и убывающие тренды GPP наблюдаются на 26 и 0,1 % территории соответственно и незначимы на остальной части сектора (рис. 4, а). Максимальные значения GPP, превышающие $0,7 \text{ кгC} \cdot \text{м}^{-2}$, наблюдаются в южной части сектора, минимальные – в горах Бырранга (п-ов Таймыр) и на плато Пutorана ($\sim 0,01 \text{ кгC} \cdot \text{м}^{-2}$). Средние по сектору величины GPP составляют $\sim 0,23 \text{ кгC} \cdot \text{м}^{-2}$ (рис. 4, б).

Между GPP и влажностью почвогрунтов наблюдаются отрицательные связи (на $>70\%$ территории), тогда как значимых положительных связей нет (рис. 4, в). Положительное воздействие снижения водной массы на GPP связано с повышением температуры корнеобитаемого слоя, улучшением дренажа и аэрации почвогрунтов, увеличением глубины оттаивания и, соответственно, толщины корнеобитаемого слоя, возрастанием доступности

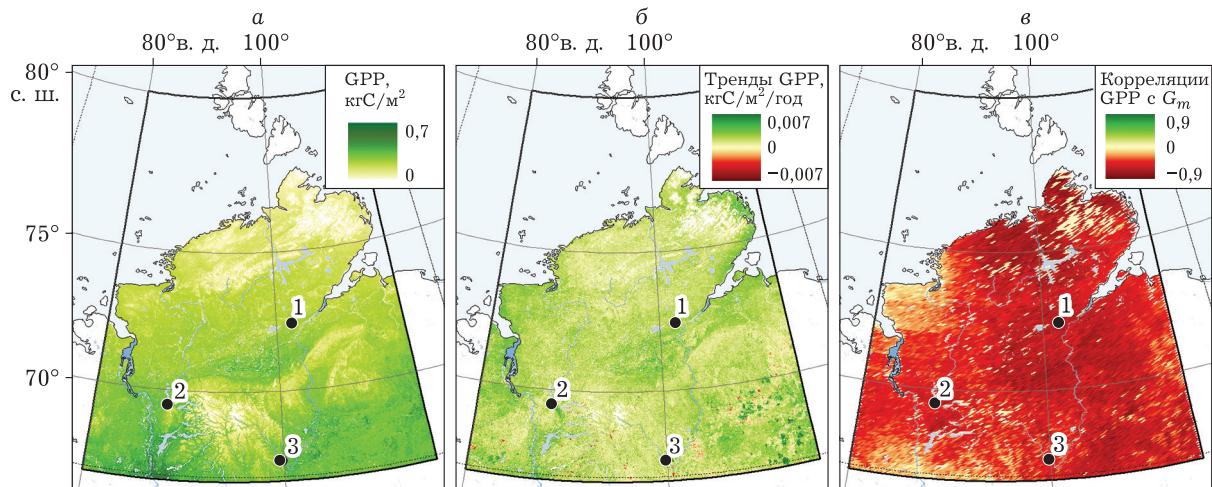


Рис. 4. Картосхемы величин (а), трендов (б) GPP и корреляций (в) GPP с водной массой (G_m). а – средняя величина GPP $0,23 \text{ кгC} \cdot \text{м}^{-2}$ (максимальные 0,7, минимальные $0,01 \text{ кгC} \cdot \text{м}^{-2}$); б – возрастающие и убывающие тренды GPP наблюдаются на 26 и 0,1 % территории сектора соответственно ($p < 0,1$), на остальной территории тренды GPP незначимы; в – снижение водной массы влечет возрастание GPP на большей (72 %) части сектора. Максимальная величина корреляции $r = -0,9$, среднее значение корреляций по всей территории $r = -0,9$ ($p < 0,1$). Положительные корреляции незначимы. Период 2001–2022 гг. 1, 2, 3 – ключевые участки “Ары-Мас”, “Пясина”, “Котуй” соответственно

биогенных элементов. Следует отметить, что в южной части Сибири отмечаются преимущественно положительные связи GPP с параметрами увлажнения, включая осадки и влажность почв [Kharuk et al., 2023c].

Динамика влажности почвогрунтов и радиальный прирост лиственницы

Между индексом прироста (ИП) лиственницы и водной массой в почвогрунтах наблюдается корреляционная связь: снижение влажности почвогрунтов влечет возрастание ИП лиственницы (рис. 5). Указанные зависимости отмечались на всех участках, где были получены керны деревьев лиственницы (Пясина, Ары-Мас и Котуй; см. рис. 1). Таким образом, улучшение гидрологического режима в местообитаниях лиственницы вследствие

снижения переувлажненности почвогрунтов стимулирует рост деревьев.

Наряду с влажностью почвогрунтов прирост лиственницы зависит и от других климатических переменных. Возрастание температуры воздуха и почвы, а также дефицита влажности воздуха (ДВП) стимулирует прирост, тогда как осадки (участок “Котуй”) негативно влияют на его величину (рис. 6).

Оценка стока воды, высвобождаемой при таянии мерзлоты

Максимальные величины аномалий гравитационной массы наблюдаются в северо-восточной части арктического сектора, минимальные – в юго-западной (рис. 7, а). Аномалии водной массы, полученные после внесения поправок на величины NPP и эмиссии

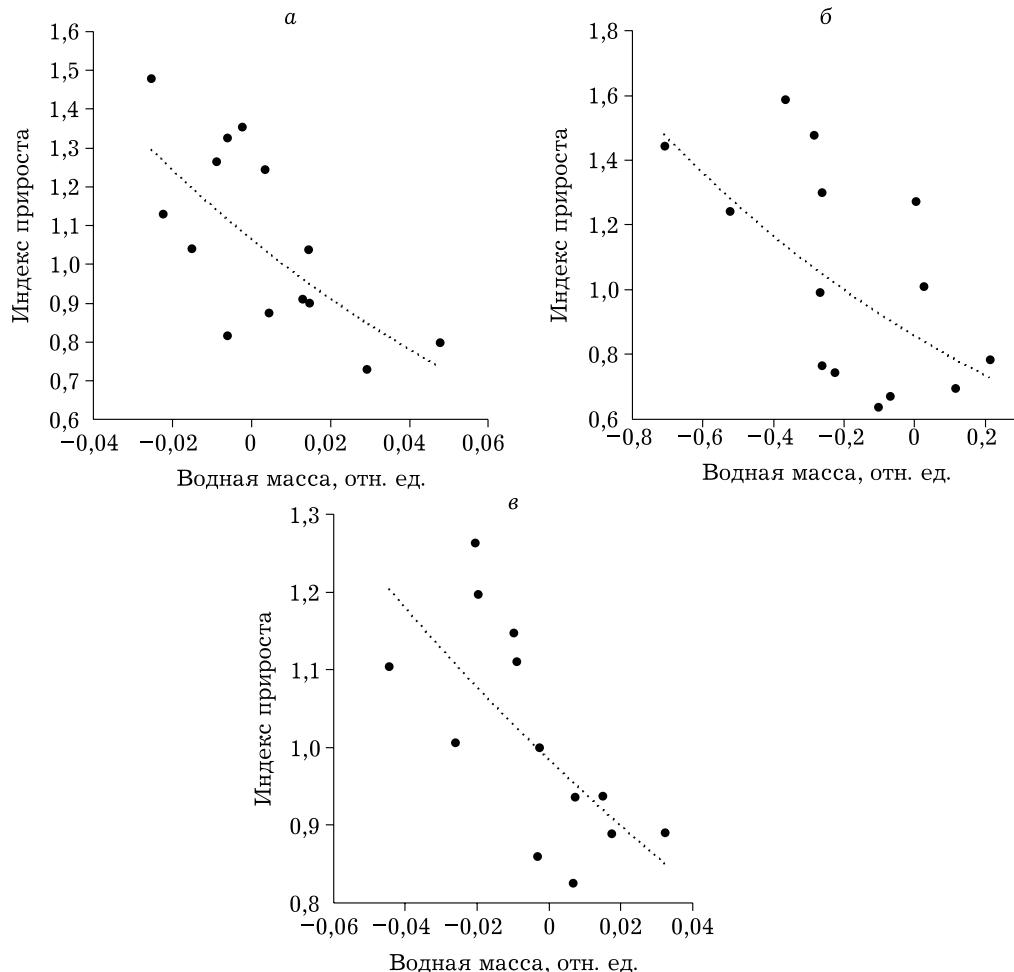


Рис. 5. Со снижением величины водной массы в почвогрунтах возрастает индекс радиального прироста лиственницы. а – участок “Пясина” ($r = -0,68$; $p < 0,01$); б – “Ары-Мас” ($r = -0,6$; $p < 0,003$); в – “Котуй” ($r = -0,68$, $p < 0,02$). Водная масса рассчитана за гидрологический год

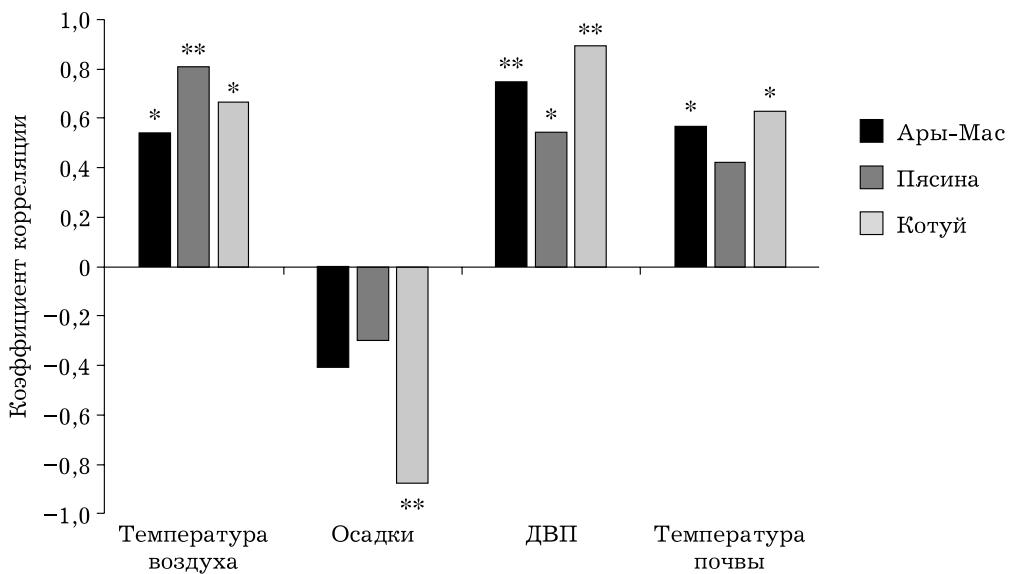


Рис. 6. Коэффициенты корреляции Спирмена между индексом прироста лиственницы и средними летними климатическими параметрами. Температура воздуха и почвы, а также дефицит влажности воздуха (ДВП) стимулируют прирост, тогда как осадки (участок “Котуй”) – ингибируют. Образцы древесины отобраны на участках “Арты-Мас”, “Пысина” и “Котуй” (см. рис. 1). * – $p < 0,1$; ** – $p < 0,05$

углерода при пожарах (уравнение (2)), представлены на рис. 7, б. Средняя величина годового стока талой воды (ΔS) составляет $6,4 \pm \pm 2,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ в год; минимальные значения оцениваются в $0,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ в год и наблюдаются преимущественно на плато Пугорана и северной части Таймыра, максимальные достигают $13,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ в год (южная и юго-западная части сектора) (таблица). Отметим, что средние годовые потери углерода в результате пожаров на два порядка ниже по сравнению с величиной чистой первичной продуктивности растительного покрова ($0,001$ и $0,24 \text{ кг}/\text{м}^2$ соответственно; см. таблицу).

ОБСУЖДЕНИЕ

В криолитозоне Средней Сибири наблюдаются многолетние тренды снижения водной массы в почвогрунтах и возрастания GPP растительного покрова, синхронизированного и тесно связанного с влажностью почвогрунтов ($r = -0,9$). Аналогичная связь установлена и для индекса прироста деревьев лиственницы ($r = -0,7$). В целом, в арктическом секторе преобладают отрицательные связи между GPP и влажностью почвогрунтов (на более 70 % площади) при отсутствии значимых положительных корреляций. Полученные результаты подтверждают ранее опубли-

кованные данные о стимулирующем влиянии снижения влажности почвы на ИП лиственницы и GPP растительности в Заполярье [Kharuk et al., 2023a, с]. Стимулирующее влияние таяния многолетнемерзлых почв на прирост лиственницы (*L. gmelinii*) зафиксировано также в горах северо-востока Китая [Zhang et al., 2016; Zhu et al., 2024]. Вместе с тем, несмотря на переувлажнение, типичное для почв Заполярья, древесные растения могут испытывать водный стресс в начале вегетационного периода, поскольку необходимая для метаболизма влага блокирована в мерзлотном слое [Kharuk et al., 2015; Zhang et al., 2016].

Температура корнеобитаемого слоя, наряду с температурой воздуха, лимитирует рост древесных растений в криолитозоне, где широко распространены так называемые “холодные почвогрунты”. Температура почв определяется как температурой воздуха, так и влажностью почв вследствие высокой теплопроводности воды.

Наблюдаемые тренды снижения влажности и повышения температуры почвогрунтов указывают на улучшение гидротермического режима произрастания растительности в Арктике.

В целом, улучшение гидротермического режима почвогрунтов наряду с возрастанием температуры воздуха представляет триг-

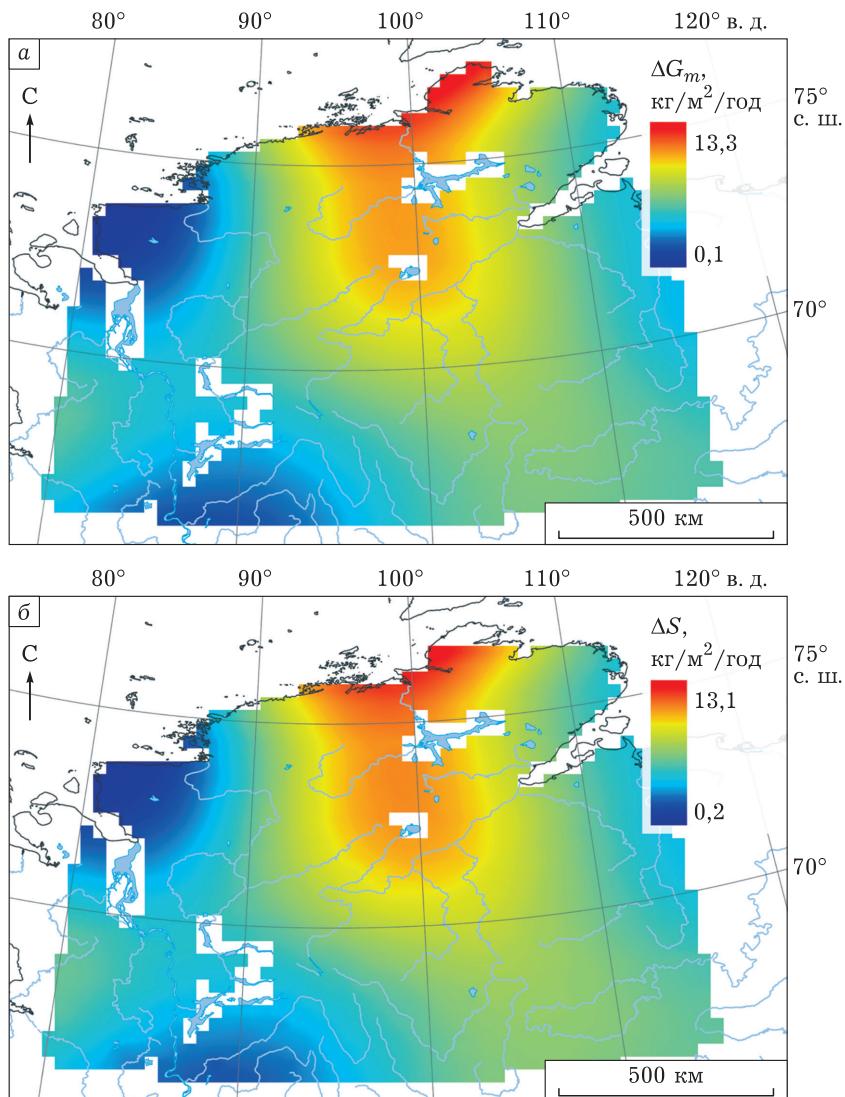


Рис. 7. Картосхемы ΔG_m (а) (разность между средними величинами аномалий гравитационной массы за 2020–2022 и 2007–2009 гг.) и ΔS (б) (величина стока талой воды)

гер возрастания индекса прироста деревьев лиственницы и GPP растительного покрова. Вместе с тем увеличение GPP влечет возникновение обратной связи, поскольку напочвенный покров представляет термоизолятор, препятствующий прогреванию и, следова-

тельно, таянию мерзлотного слоя [Heijmans et al., 2022].

Таяние мерзлоты способствует возрастанию глубины корнеобитаемого слоя и сопровождается стоком высвобождаемой воды, средняя величина которого составляет $6,4 \pm 2,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$

Статистические показатели переменных ($\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$) в пределах сектора на рис. 7 (площадь ~1,2 млн км^2)

Переменная	Min	Max	Среднее	σ	Доля от средней ΔS , %
ΔS	0,233	13,069	6,409	2,339	100
ΔG_m	0,084	13,320	6,210	2,394	96,9
ΣNPP	0,000	0,578	0,198	0,091	3,1
ΣF	0,000	0,059	0,001	0,004	<0,02

в год. Следует отметить, что аномалии осадков не влияют на полученный результат, поскольку в целом на исследуемой территории значимые тренды осадков отсутствуют. Снижение уровня переувлажнения способствует улучшению дренажа почв, обогащению корнеобитаемого слоя кислородом и биогенными элементами. Например, в зоне несплошной мерзлоты (Западная Сибирь) глубина оттаивания достигает 2–8 м [Vasiliev et al., 2020]. Наряду со стоком талой воды происходит ее “консервация” вследствие заболачивания и формирования водоемов, особенно при таянии обогащенных льдом почвогрунтов и сопровождающихся термокарстом [Nitzbon, 2020]. Потепление стимулирует также солифлюкционные процессы, течение переувлажненных почв на склонах [Kharuk et al., 2016; Heijmans et al., 2022]. В частности, в последнее десятилетие на Таймыре более чем на порядок увеличилась частота оползней, что сопровождалось резким (>20 крат) увеличением фиксации углерода [Bernhard et al., 2022].

В ряде регионов на таяние мерзлотных почвогрунтов наряду с температурой воздуха значимое воздействие оказывает возрастание “теплых дождей” [Heijmans et al., 2022]. Однако увеличение осадков влечет снижение ИП в гиперувлажненных местообитаниях лиственницы (см. рис. 6).

К основным факторам, определяющим динамику гравитационной массы в криолитозоне, относится, наряду с массой воды (в твердом и жидкоком состоянии), возрастающая биомасса растительного покрова. Поправка на деструкцию и потребление биомассы консументами различного порядка (k – “коэффициент сохранности” биомассы; уравнение (2)) была принята, опираясь на данные, приведенные в статье [Camill et al., 2001], равной $k = 0,9$. Указанная поправка может различаться в различных фитоценозах, однако ее достоверные величины в доступной литературе отсутствуют. Отметим, что вне криолитозоны аномалии гравитационной массы могут зависеть преимущественно от динамики продуктивности растительного покрова. Другой важный фактор, влияющий на гравитационную массу, – это потери углерода при периодических пожарах. Оценка пирогенных эмиссий углерода оказалась неожиданно ниже (на два порядка) по сравнению с чистой первичной продуктивностью (NPP, см. табли-

цу). Следует отметить, что, несмотря на возрастающую горимость в высоких широтах, основная масса пирогенных эмиссий наблюдается в сокращающихся древостоях, произрастающих к югу от полярного круга [de Groot et al., 2013; Kharuk et al., 2022].

В целом, таяние многолетнемерзлых почвогрунтов криолитозоны, обусловленное потеплением климата, способствует увеличению продуктивности растительного покрова и, несмотря на возрастающую горимость, сохранению криолитозоной статуса стока углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковая гравиметрия позволяет оценить динамику водной массы в почвогрунтах и сток воды, высвобождаемой при таянии мерзлоты криолитозоны. Выявлен многолетний тренд снижения влажности почвогрунтов на севере Средней Сибири, оценена средняя величина стока воды, высвобождаемой при таянии мерзлоты. В условиях переувлажнения, типичного для криолитозоны, уменьшение влажности почв повлекло возрастание индекса прироста деревьев лиственницы, основной лесообразующей породы в криолитозоне, и увеличение продуктивности растительного покрова. В целом, при потеплении климата и таянии многолетней мерзлоты происходит улучшение гидротермического режима почвогрунтов, возрастание GPP и NPP, что способствует сохранению криолитозоной статуса территории стока углерода.

Вклад авторов

Харук В. И. – концепция; Голюков А. С., Им С. Т., Петров И. А., Двинская М. Л., Швецов Е. Г. – сбор и обработка данных; Харук В. И., Голюков А. С., Им С. Т., Петров И. А., Двинская М. Л., Швецов Е. Г. – анализ данных; В. И. Харук – подготовка рукописи статьи с комментариями соавторов.

Финансирование

Работа поддержана программой Томского государственного университета “Приоритет 2030” и Базовым проектом ФИЦ КНЦ № FWES-2024-0023.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Матвеева Н. В. Зональность в растительном покрове Арктики. 1998. СПб., 220 с. (Тр. БИН РАН; Вып. 21).
- Цветков П. А. Исследование природы пожаров в северной тайге Средней Сибири // Хвойные бореальны зоны. 2006. № 23. С. 186–195.
- Якушкян Г. Д., Кокорев Я. И., Колпащиков Л. А. Природные зоны и мир животных Таймыра. Белгород: Изд-во “ЛитКараВан”, 2012. 276 с.
- Anisimov O., Kokorev V., Zhil'tsova Y. Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: case study of Northern Eurasia // Clim. Change. 2013. Vol. 118. P. 871–883.
- Barletta V. R., Sørensen L. S., Forsberg R. Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica // The Cryosphere. 2013. Vol. 7. P. 1411–1432. www.the-cryosphere.net/7/1411/2013/ doi:10.5194/tc-7-1411-2013
- Bernhard P., Zwieback S., Hajnsek I. Accelerated mobilization of organic carbon from retrogressive thaw slumps on the northern Taymyr Peninsula // The Cryosphere. 2022. Vol. 16. P. 2819–2835. <https://doi.org/10.5194/tc-16-2819-2022>
- Bongioannini C. P., Saraceni M., Silvestri L., Meniconi S., Brunone B. Monitoring the water mass balance variability of small shallow lakes by an ERA5-land reanalysis and water level measurement-based model. An application to the Trasimeno Lake, Italy // Atmosphere. 2022. Vol. 13. P. 49. <https://doi.org/10.3390/atmos13060949>
- Camill P., Lynch J. A., Clark J. S., Adams J. B., Jordan B. Changes in Biomass, Aboveground Net Primary Production, and Peat Accumulation following Permafrost Thaw in the Boreal Peatlands of Manitoba, Canada // Ecosystems. 2001. Vol. 4. P. 461–478. doi: 10.1007/s10021-001-0022-3
- Cao Y., Fu C., Wang X., Dong L., Yao S., Xue B., Wu H., Wu H. Decoding the dramatic hundred-year water level variations of a typical great lake in semi-arid region of northeastern Asia // Sci. Total Environment. 2021. Vol. 770. 145353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145353>
- Cook E. R., Kairiukstis L. A. Methods of dendrochronology: applications in the environmental science. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1990.
- de Groot W. J.; Flannigan M. D., Cantin A. S. Climate change impacts on future boreal fire regimes // Forest Ecol. and Management. 2013. Vol. 294. P. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.027>
- Delcourt C., Akhmetzyanov L., Combee A., Izbicki B. J., Kukavskaya E., Mack M. C., Maximov T. C., Petrov R. E., Rogers B. M., Sass-Klaassen U., Scholten R., Shestakova T., van Wees D., Veraverbeke S. Fire Severity and Carbon Combustion in Larch Forest Ecosystems of Northeast Siberia // AGU Fall Meeting. 2021. B25M-1649.
- Duursma R. A. Plantecophys – An R Package for Analysing and Modelling Leaf Gas Exchange Data // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. e0143346. doi: 10.1371/journal.pone.0143346
- Fox-Kemper B., Hewitt H. T., Xiao C., Apalgeirsdyttir G., Drijfhout S. S., Edwards T. L., Golledge N. R., Hemer M., Kopp R. E., Krinner G., Mix A., Notz D., Nowicki S., Nurhati I. S., Ruiz L., Sallée J.-B., Slanegen A. B. A., Y. Yu. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T. K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, N. Y., USA, Cambridge University Press, 2022. P. 1211–1362. doi: 10.1017/9781009157896.011
- Gronewold A. D., Smith J. P., Read L. K., Crooks J. L. Reconciling the water balance of large lake systems // Adv. Water Resour. 2020. Vol. 137. 103505. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103505>
- Heijmans M. M. P. D., Magnússon R. Í., Lara M. J., Frost G. V., Myers-Smith I. H., van Huissteden J., Jorgenson M. T., Fedorov A. N., Epstein H. E., Lawrence D. M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // Nat. Rev. Earth. Environ. 2022. Vol. 3. P. 68–84. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0>
- Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-ring Bull. 1983. Vol. 44. P. 69–75.
- Hu G., Zhao L., Wu T., Wu X., Park H., Fedorov A., Wei Y., Li R., Zhu X., Sun Z., Ni J., Zou D. Spatiotemporal variations and regional differences in air temperature in the permafrost regions in the Northern Hemisphere during 1980–2018 // Sci. Total Environment. 2021. Vol. 791. 148358. ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148358>
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Im S. T., Golyukov A. S., Smith K. T. Wildfires in the Siberian Arctic // Fire. 2022. Vol. 5 (4). P. 106. <https://doi.org/10.3390/fire5040106>
- Kharuk V. I., Petrov I. A., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Im S. T., Shushpanov A. S. Larch growth across thermal and moisture gradients in the Siberian Mountains // J. Mt. Sci. 2023a. Vol. 20. P. 101–114. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7433-3>
- Kharuk V. I., Petrov I. A., Im S. T., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Shushpanov A. S., Savchenko A. P., Temerova V. L. Subarctic Vegetation under the Mixed Warming and Air Pollution Influence // Forests. 2023b. Vol. 14 (3). P. 615. <https://doi.org/10.3390/f14030615>
- Kharuk V. I., Petrov I. A., Krivobokov L. V., Golyukov A. S., Dvinskaya M. L., Im S. T., Shushpanov A. S., Smith K. T. Larch response to warming in northern Siberia // Reg. Environ. Change. 2023c. Vol. 23. P. 17. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-02016-9>
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T., Petrov I. A. Climate-induced larch growth response within Central Siberian permafrost zone // Environ. Res. Lett. 2015. Vol. 10. 125009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125009>
- Kharuk V. I., Shushpanov A. S., Im S. T., Ranson K. J. Climate-Induced Landslides within the Larch Dominant Permafrost Zone of Central Siberia // Environ. Res. Lett. 2016. Vol. 11. doi: 10.1088/1748-9326/11/4/045004

- Liljedah A. K., Boike J., Daanen R. P., Fedorov A. N., Frost G. V., Grosse G., Hinzman L. D., Iijma Y., Jorgenson J. C., Matveyeva N., Necsoiu M., Reynolds M. K., Romanovsky V. E., Schulla J., Tape K. D., Walker D. A., Wilson C. J., Yabuki H., Zona D. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // *Nat. Geosci.* 2016. Vol. 9. P. 312–318. <https://doi.org/10.1038/ngeo2674>
- Muñoz-Sabater J. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2021. <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb3>
- Nitzbon J., Westermann S., Langer M., Martin L. C. P., Strauss J., Laboer S., Boike J. Fast response of cold ice-rich permafrost in northeast Siberia to a warming climate // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11. P. 2201. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15725-8>
- Rantanen M., Karpechko A. Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Commun. Earth Environ.* 2022. Vol. 3. P. 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Rinn F. TSAP V 3.6. Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. Germany: Heidelberg, Frank Rinn Distrib, 1996. 293 p.
- Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Istanas A., Leibman M., McGuire A., Shiklomanov N., Smith S., Walker D. Changing permafrost and its impacts // *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA)*. 2017. P. 65–102.
- R-Studio 2024.04.1 build 748 <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>
- Running S., Mu Q., Zhao M. MODIS/Terra Gross Primary Productivity 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A2H.061>
- Running S., Zhao M. MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061>
- Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *J. Am. Stat. Assoc.* 1968. Vol. 63. P. 1379–1389.
- Speer J. H. Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press, 2010. 509 p.
- StatSoft Statistica <https://www.r-project.org>
- Vasiliev A., Drozdov D. S., Gravis A. G., Malkova G. V., Nyland K. E., Streletskaia D. A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12>
- Veraverbeke S., Delcourt C. J. F., Kukavskaya E., Mack M., Walker X., Hesselt T., Rogers B., Scholten R. C. Direct and longer-term carbon emissions from arctic-boreal fires: A short review of recent advances // *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.* 2021. Vol. 23. P. 100277. ISSN 2468-5844, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100277>
- Wang Z., Zhang B., Yao Y., Zhang W. GRACE and mass budget method reveal decelerated ice loss in east Greenland in the past decade // *Remote Sensing of Environment.* 2023. Vol. 286. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113450>
- Webb L. E., Alexander H. D., Paulson A. K., Loranty M. M., DeMarco J., Talucci A. C., Spektor V., Zimov N., Lichstein J. W. Fire-Induced Carbon Loss and Tree Mortality in Siberian Larch Forests // *Geophys. Res. Lett.* 2024. Vol. 51. e2023GL105216. <https://doi.org/10.1029/2023GL105216>
- Zhang X., Ba X., Chang Y., Chen Z. Increased sensitivity of Dahurian larch radial growth to summer temperature with the rapid warming in Northeast China // *Trees.* 2016. Vol. 30. P. 1799–1806. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1413-6>
- Zhu L., Wang M., Camarero J. J., Cooper D. J., Yuan D., Chen Z., Wang X., Cherubini P. Permafrost melting enhances growth but leads to less intra-annual density fluctuations in boreal *Larix gmelinii* forests at its southernmost limit in northeast China // *Ecol. Indicat.* 2024. Vol. 164. 112158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112158>

Satellite gravimetry in studies of permafrost thawing and permafrost vegetation productivity.

V. I. KHARUK^{1, 2, 3*}, A. S. GOLYUKOV^{1, 2, 3}, M. L. DVINSKAYA^{1, 3}, S. T. IM^{1, 2, 3, 4},
I. A. PETROV^{1, 2, 3}, E. G. SHVETSOV^{1, 3}

¹*V. N. Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk Science Centre of the Siberian Branch
of Russian Academy of Science
50/28, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

²*Tomsk State University
36, Lenina st., Tomsk, 634050, Russia*

³*Siberian Federal University
79, Svobodny ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia*

⁴*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarsky Rabochy st., Krasnoyarsk, 660014, Russia*

Changes in the soil hydrothermal regime caused by the permafrost layer melting, represent the most important environmental factor in the dynamics of vegetation cover in the permafrost zone. The impact of soil melting on the growth index (GI) of larch (*Larix* spp.) and on the gross and net primary productivity (GPP, NPP) of vegetation in the Arctic region of Central Siberia (open woodlands, tundra and forest-tundra) was studied. The following hypotheses were tested: (1) gravimetric data make it possible to estimate the water mass dynamics in soils; (2) thawing of frozen soils stimulates the growth of woody plants and the productivity of vegetation. The work used dendrochronology methods, field data, satellite gravimetry (GRACE survey) and GPP (Terra/MODIS survey). Analysis of gravimetry data revealed a significant long-term trend in water mass decreasing in soils of the permafrost zone ($R^2 = 0.68$). The amount of water released during melting is estimated at $6.4 \pm 2.3 \text{ kg/m}^2$ per year. A close connection was found between larch GI and GPP with moisture anomalies in soils ($r = -0.7$ and $r = -0.9$, respectively). The increasing temperature of the root layer and the moisture deficiency in water vapor also have a positive effect on the GI of larch and the vegetation GPP value in general ($r = 0.6$ and $r = 0.6\ldots0.9$, respectively). It was found that pyrogenic carbon losses are significantly (by two orders of magnitude) lower than the NPP value. In conditions of waterlogging of soils, typical for the Arctic, climate warming is accompanied by an improvement in the hydrothermal regime of vegetation growth, promotes an increase in vegetation productivity and the permafrost zone maintains the status of a carbon sink area.

Key words: permafrost thawing, forest-tundra, GRACE, gravimetry, permafrost zone, northern larch forests, forest-tundra productivity.