

УДК 574.4(57.045)

ЛАТЕРАЛЬНЫЙ СТОК УГЛЕРОДА В КРИОЛИТОЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

А. С. Прокушкин^{1,2}, Т. Н. Гейс^{1,2}, Р. А. Колосов¹, М. А. Корец¹, А. В. Панов¹,
Д. А. Полосухина^{1,2}, М. П. Прокушкина², С. В. Титов¹, И. В. Токарева¹,
Н. В. Сиденко¹, Ю. В. Шамонина¹, С. Г. Прокушкин¹

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

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

E-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru, geys.00@mail.ru, kolosov.ra@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru,
alexey.v.panov@gmail.com, polosukhina@ksc.krasn.ru, Mprokushkina@sfu-kras.ru, titov-sergey@mail.ru,
gavrilenko@ksc.krasn.ru, nikita.v.sidenko@gmail.com, shamonina@ksc.krasn.ru, stanislav@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

Количественные оценки баланса углерода ландшафтов суши и особенно криолитозоны, где наблюдаются наиболее значимые тренды потепления, требуют учета экспорта терригенного углерода за их пределы с латеральным стоком. В работе представлены результаты многолетнего круглогодичного мониторинга внутри-сезонных и межгодовых флуктуаций концентраций растворенного органического (РОУ) и неорганического (РНУ) углерода в гидрографической сети Среднесибирского плоскогорья, осуществляемого на базе Эвенкийского стационара Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (п. Тура). Исследования проводились на более чем 100 водотоках разного порядка в среднем течении р. Нижняя Тунгуска (62–66° с. ш., 96–102° в. д.) на основе регулярного измерения концентраций всех форм углерода, а также квазинепрерывного мониторинга физико-химических параметров водотоков с помощью автоматических логгеров-регистраторов. Показано, что основными лимитирующими факторами латерального стока углерода в пределах Среднесибирского плоскогорья в настоящее время являются запасы потенциально мобилизуемого органического углерода в наземных ландшафтах и количество осадков в условиях резко континентального климата. Рост стока органического углерода прогнозируется в результате как оттаивания богатых C_{org} мерзлых толщ, так и повышения продуктивности растительного покрова, а неорганического углерода – вследствие повышения скоростей выветривания горных пород и секвестрации атмосферного CO_2 . Отрицательные прогнозы поведения РОУ связываются с увеличением глубины инфильтрации растворов с ростом сезонно-талого слоя почвы, что определяет сорбцию РОУ в почвенной толще и его микробиологическую деструкцию. Возрастание площадей и интенсивности пожаров в результате потепления климата определяет существенную трансформацию латерального стока углерода. При этом наблюдаемое сокращение стока рек в результате усиления пирогенного фактора будет определять общее снижение транспорта терригенного углерода из наземных ландшафтов.

Ключевые слова: углерод, латеральный сток, водотоки разных порядков, пожары, Среднесибирское плоскогорье.

DOI: 10.15372/SJFS20240307

ВВЕДЕНИЕ

Лиственный леса занимают значительную часть территории Северной Евразии и приурочены к зоне распространения многолетне-мерзлых пород (Зырянова и др., 2008; Abaimov,

2010; Kirdeyanov et al., 2020; Prokushkin et al. 2021). Вследствие своих масштабов и экофизиологических особенностей они играют значимую роль как в континентальном гидрологическом цикле, так и в глобальном круговороте углерода (Vygodskaya et al., 1997; Ольчев и др., 2022;

© Прокушкин А. С., Гейс Т. Н., Колосов Р. А., Корец М. А., Панов А. В., Полосухина Д. А., Прокушкина М. П., Титов С. В., Токарева И. В., Сиденко Н. В., Шамонина Ю. В., Прокушкин С. Г., 2024

Ol'chev et al., 2022). В деятельном слое почв и мерзлоте экосистем высоких широт сосредоточены около 50 % мирового почвенного органического углерода, а также существенные запасы элементов минерального питания (Tagnosai et al., 2009; Hugelius et al., 2014, 2020). Таким образом, понимание роли листовничников в регулировании регионального климата и циклов элементов становится все более актуальным по мере повышения температур воздуха, деградации мерзлоты и смещения растительных зон к северу (Tshebakova et al., 2009).

Латеральный сток углерода из наземных ландшафтов в конечные водоемы стока через гидрографическую сеть представляет собой один из ключевых связующих элементов глобального цикла углерода. Более того, расчет баланса углерода наземных биогеоценозов требует учета экспорта терригенного углерода за пределы ландшафта, что не рассматривается в применяемых методиках оценки поглощений парниковых газов, включая метод турбулентных пульсаций (Куричева и др., 2023). Следует подчеркнуть, что существующая программа гидрохимического мониторинга системы Росгидромета, включающая определение концентраций и стока неорганического (гидрокарбонат-ион) и органического (ХПК) углерода имеет ряд существенных недостатков, а именно: расположение постов на крупных водотоках, использование устаревших методик (бихроматная окисляемость) и продолжительное время между отбором проб и их анализом. Таким образом, создание системы мониторинга латеральных потоков углерода из наземных ландшафтов в водотоки и водоемы на основе современных инструментальных измерений является необходимой и крайне важной задачей.

Углерод в пресноводных системах (речная сеть, болота, водохранилища, озера и пр.) может быть представлен растворенным и взвешенным органическим и неорганически углеродом. Образование каждой из этих форм в наземных ландшафтах, их миграция и трансформация в пресноводных системах требует детальных количественных и качественных оценок с учетом сезонности гидрологических и биогеохимических процессов, разнообразия природно-климатических условий и нарушений растительного покрова в результате пожаров и рубок.

Латеральный (гидрологический) экспорт углерода в бореальных и тундровых биомах варьируется в течение гидрологического года с преобладанием в годовом стоке периода весеннего половодья (Finlay et al., 2006; Prokushkin A. S.

et al., 2011; Holmes et al., 2012). Изменения количественного и качественного состава стока растворенного органического углерода (РОУ) и неорганического (РНУ) в течение года обусловлены изменением источников питания рек, что связано с динамикой глубины сезонно-талого слоя – деятельного слоя почвы (MacLean et al., 1999; Prokushkin et al., 2007). Анализ оптических и флуоресцентных параметров РОУ (McKnight et al., 2001; Weishaar et al., 2003) широко используется для разделения вклада в ежегодный сток его отдельных источников в наземных экосистемах. Специфические биомаркеры, например такие, как лигнин, характеризующие сигналы органического вещества растительности и его трансформации в почве, дают еще более детальное представление о процессах формирования латерального стока углерода в наземных экосистемах (Amon et al., 2012). Растворенный черный (пирогенный) углерод (BC) представляет собой еще один важный маркер, позволяющий диагностировать пожарные нарушения на речных бассейнах (Guggenberger et al., 2008; Myers-Pigg et al., 2015).

Роль рек не исчерпывается транзитом вещества, поступающего в них из наземных ландшафтов. Так, по существующим оценкам конечных водоемов стока может достигать менее 20 % растворенного органического вещества, поступающего из почв в русловой сток (Drake et al., 2018), а гидрографическая сеть представляет собой «биореактор», в котором происходит трансформация и, в конечном итоге, минерализация терригенного органического вещества до CO_2 и CH_4 (Гончарова и др., 2023; Goncharova et al., 2023). Вследствие этого пресные воды, как правило, перенасыщены («oversaturated») парниковыми газами и характеризуются значительным эмиссионным потоком с поверхности их водного зеркала. Таким образом, в задачи мониторинга латерального стока углерода необходимо включение инструментальных измерений как концентраций CO_2 и CH_4 в водных объектах, так и эмиссионных потоков с их поверхности.

На базе Эвенкийского стационара Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (ИЛ СО РАН) (п. Тура) проводятся многолетние круглогодичные исследования внутрисезонных и межгодовых флуктуаций концентраций углерода в гидрографической сети Среднесибирского плоскогорья с целью интеграции значений латерального стока в расчеты его баланса в наземных экосистемах и определения источников на основе качественных характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования латеральных потоков углерода на территории Среднесибирского плоскогорья (плато Сыверма) проводятся с 1998 г. на базе Эвенкийского опорного экспедиционного пункта ИЛ СО РАН (п. Тура Эвенкийского муниципального района Красноярского края ($64^{\circ}17' \text{ с. ш.}, 100^{\circ}11' \text{ в. д.}$)) (рис. 1).

Среднесибирское плоскогорье включает в себя обширную трапповую провинцию, сформированную на границе пермского и триасового периодов (248–252 млн л. н.) в результате длительного излияния лав.

Лавовое плато Сыверма имеет специфический характер рельефа: частое чередование плотных лавовых покровов с туфами обуславливает резко выраженную ступенчатость склонов, причем плоские поверхности ступеней сложены плотными лавами, а уступы образованы подстилающими их туфами (Кушев, Леонов, 1964). Территория имеет густое и глубокое расчленение (150–700 м) параллельно вытянутыми в юго-восточном направлении долинами рек Виви, Таймура, Ямбукан, Тембенчи, Эмбенчи-

ме, Кочечум и др. Поверхность рассматриваемой территории представляет собой средневысокое плато с наибольшей абсолютной отметкой (1331 м н. у. м.) в верховьях р. Тембенчи.

Климат. Район имеет резко континентальный климат, согласно классификации Кёппена – Dfc, холодный (континентальный), без сухого сезона, с холодным летом. По данным метеостанции в п. Тура, среднемноголетняя (1928–2023 гг.) температура воздуха в январе составляет -35.7°C , а июля 16.7°C . За период наших исследований (с 1998 по 2023 г. включительно) отмечается рост среднемесячных температур относительно всего периода метеонаблюдений: в зимние месяцы от 0.2°C в декабре и до 1.8°C в феврале, в мае и июне – на 1.1 и 1.7°C , в июле и августе – на 0.5 и 0.6°C (рис. 2).

Максимальный прирост температур приходится на март (2.3°C). Среднегодовое значение температуры воздуха за весь период составляет -8.7°C , а в 1998–2023 гг. -7.6°C . Расчеты аномалий среднегодовой температуры воздуха относительно двух базовых периодов (1961–1990 и 1991–2000 гг.) представлены на рис. 3. В 1998–2023 гг. наблюдался прирост среднегодовых температур со скоростью $0.11^{\circ}\text{C}/\text{год}$

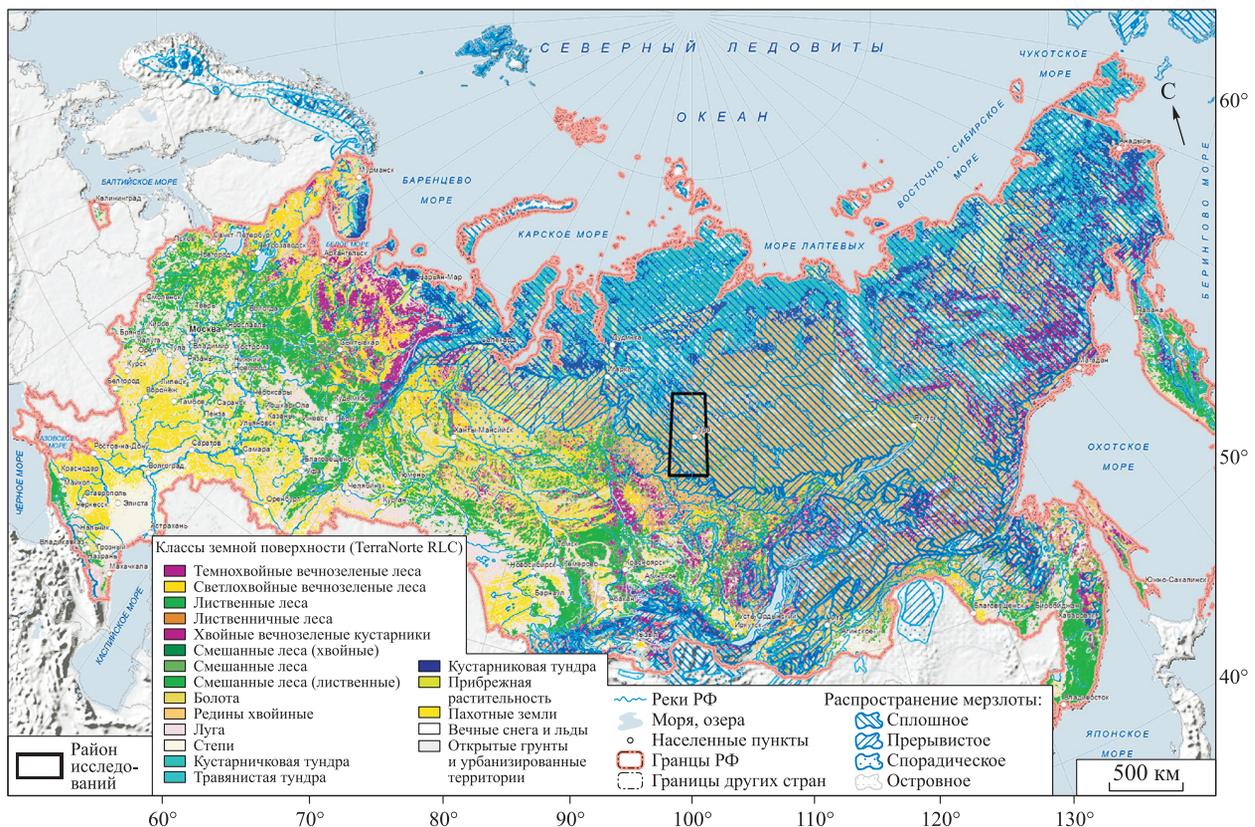


Рис. 1. Карта растительного покрова и распространения многолетней мерзлоты на территории Российской Федерации с выделенной территорией охвата исследований.

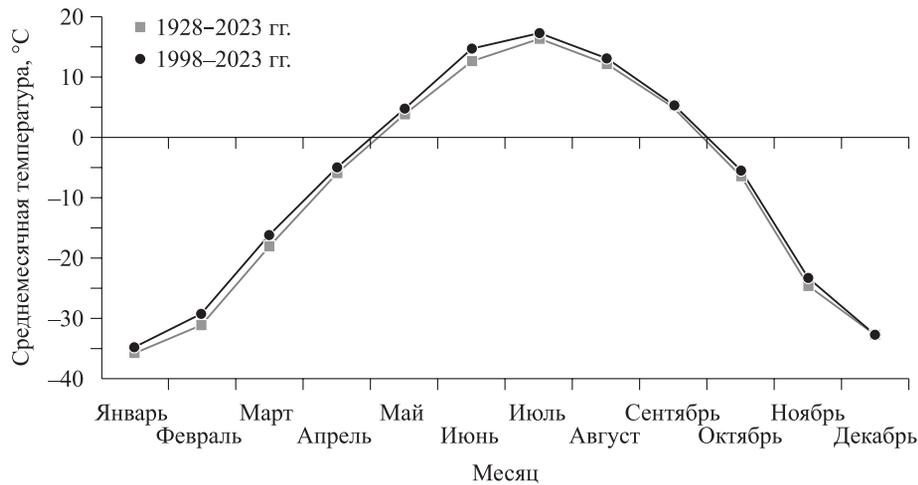


Рис. 2. Среднемесячная температура воздуха в периоды инструментальных наблюдений (1928–2023 гг.) и исследований коллектива (1998–2023 гг.) на метеорологической станции Тура.

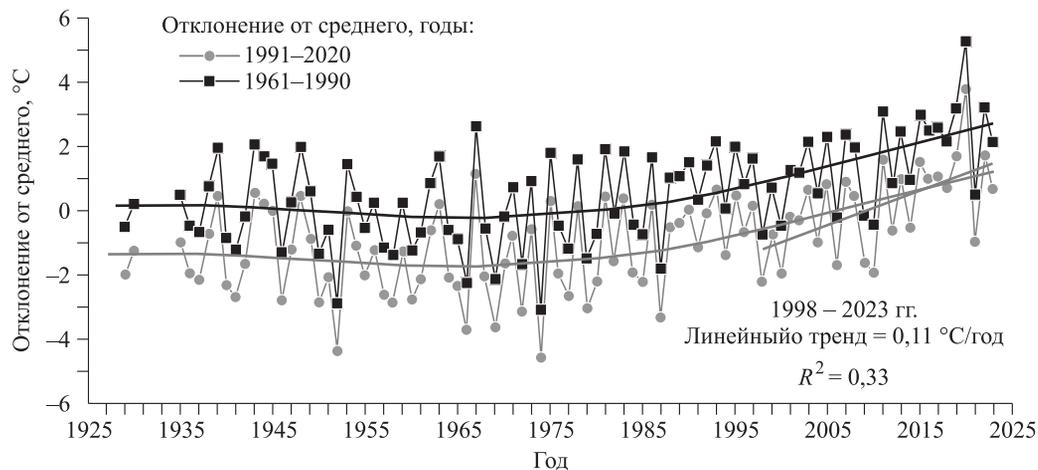


Рис. 3. Аномалии среднегодовой температуры воздуха по данным наблюдений на метеорологической станции Тура относительно двух базовых периодов – 1991–2020 и 1961–1990 гг. На рисунке приведен тренд среднегодовой температуры воздуха для периода исследований латеральных потоков углерода на Эвенкийском стационаре (1998–2023 гг.).

(или 1.1 °C/10 лет). Среднегодовое количество осадков составляла 363 и 371 мм за периоды 1928–2023 и 1998–2023 гг. соответственно. На вегетационный период (май – сентябрь) приходится около 66 % (240 мм) выпадающих осадков за год и без существенных изменений за последние 25 лет.

Распределение по месяцам претерпело некоторые изменения, а именно, в мае и августе отмечается рост осадков (4.6 и 5.8 мм соответственно), при снижении их количества в июле, августе и сентябре (на 3.5, 3.5 и 0.5 мм).

Гидрологический режим. Для рек района исследований характерен снеговой тип питания. Так, на весеннее половодье (май-июнь) у р. Нижняя Тунгуска (гидрологический пост

«Тура» Среднесибирского УГМС) приходится 66 % годового стока при межгодовой вариации от 51 до 88 % за 1939 – 2023 гг. (рис. 4). Речной сток в период открытой воды (с июля по октябрь) составляет 32 % (10–48 %) от годового, а на зимнюю межень (ноябрь – апрель) приходится лишь около 2 % (1–10 %). Среднегодовое количество осадков р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура, согласно данным гидрологического поста, составляет 55 км³/год (37–92 км³/год) – около 50 % от стока реки в ее устьевой части (створ Большой порог – 110 км³/год).

Растительный и почвенный покров. Растительный покров Среднесибирского плоскогорья имеет четко выраженную широтную зональность от высокогорных тундр северной части

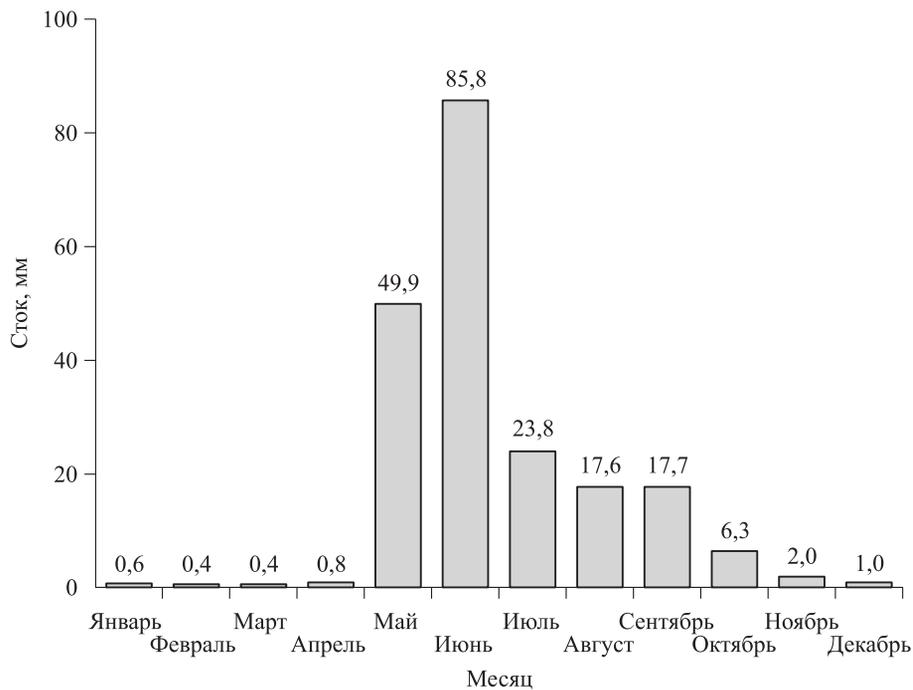


Рис. 4. Среднеголетние значения распределения годового стока по месяцам для р. Нижняя Тунгуска за 1939–2023 гг. согласно наблюдениям на гидрологическом посту «Тура» Среднесибирского УГМС.

до темнохвойных насаждений средней тайги на юге. Район проводимых нами исследований согласно зонированию растительного покрова России (Огуреева и др., 1999) относится к Среднесибирской гипоарктической (таежной) зоне – редколесно-таежный (ольховые, багульниково-зеленомошные леса – лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Rupr.), заросли ольховника). На лесопокрытую площадь приходится около 80 % всей территории. Наиболее распространены такие группы типов леса, как лишайниковая, кустарничково-моховая, сфагновая. Реже встречаются толокнянковая, зеленомошная и вейниковая. Главной лесообразующей породой является лиственница Гмелина, с существенно меньшим вкладом – сосна сибирская кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), березы повислая (*Betula pendula* Roth) и белая (*B. alba* L.). Из кустарников, формирующих самостоятельные фитоценозы, следует отметить ольху кустарниковую (*Duschekia fruticosa* (Rupr.) Pouzar), березу карликовую (*Betula nana* L.s.l.), виды рода ив (*Salix* L.). В живом напочвенном покрове преобладают вересковые кустарнички и сплошной мохово-лишайниковый покров.

Суровые климатические условия определяют широкое распространение многолетней мерзлоты, наблюдающуюся как в покровных четвертич-

ных отложениях (ледниковые, водно-ледниковые, аллювий надпойменных террас), так и коренных породах (нижнетриасовые образования траппового комплекса, представленные туфами и базальтами). Распространение мерзлоты в бассейнах рек варьирует от повсеместно сплошного (например, реки Кочечум, Виви, Ямбухан) и от сплошного на севере до прерывистого и островного на юге бассейна р. Нижняя Тунгуска.

Почвообразующими породами на рассматриваемой территории являются преимущественно переотложенные и перемешанные криодинамическими и склоновыми процессами продукты выветривания лавового комплекса, имеющие разные генезис (делювиально-солифлюкционный, флювиогляциальный, аллювиальный) и гранулометрический состав (мелкоземисто-глибовый, мелкоземисто-гравийно-галечниковый, от супесей до суглинков и глин) (Ершов, 1995). Почвенный покров в пределах изучаемых водосборных бассейнов мозаичен, варьируя от подбуров грубогумусных (глубина сезонно-талого слоя (СТС) > 1 м) на хорошо прогреваемых и дренируемых склонах южных экспозиций до маломощных криоземов глееватых (СТС < 0.3 м) на склонах северных экспозиций и торфяных олиготрофных мерзлотных почв на выположенных или пониженных участках рельефа (Старцев и др., 2017; Startsev et al., 2017).

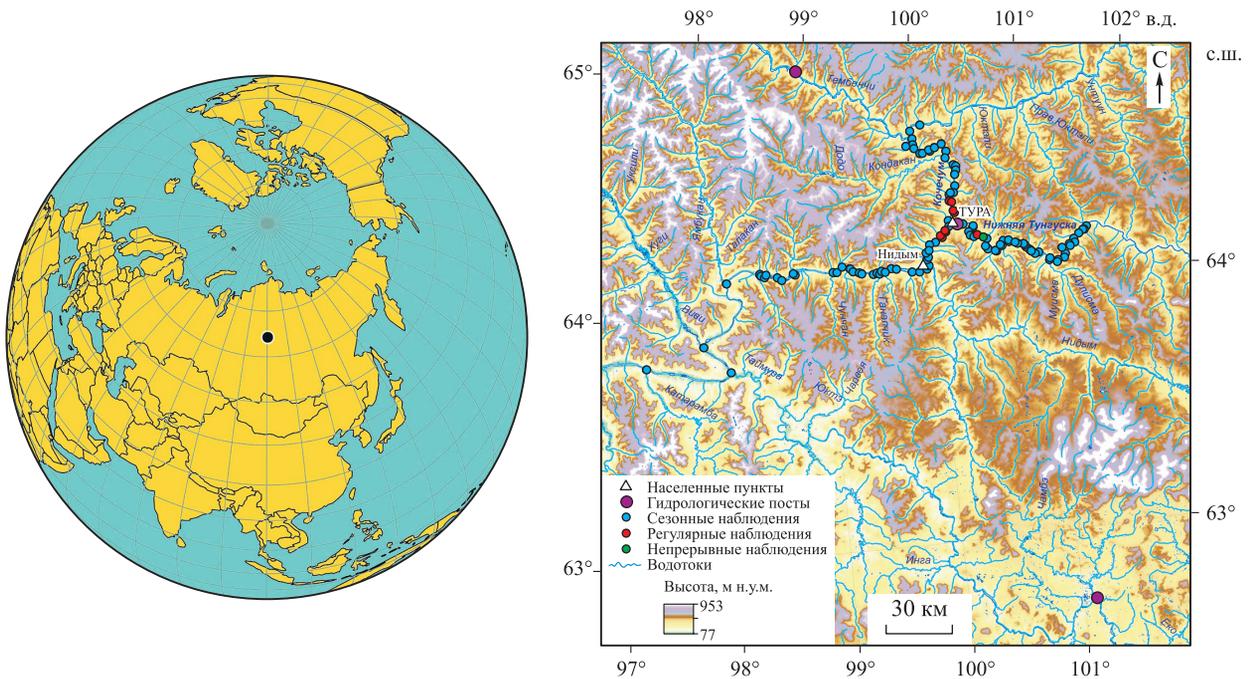


Рис. 5. Карта-схема точек размещения постов мониторинга в устьевых частях водотоков разных порядков среднего течения бассейна р. Нижняя Тунгуска.

Лесные пожары представляют собой основной дестабилизирующий фактор функционирования лиственных экосистем Сибири. Для территории исследований (64° с. ш.) V. I. Kharuk и соавт. (2011) приводят межпожарный интервал в 82 ± 7 лет. Сроки восстановления лесных биогеоценозов и гидротермического (мерзлотного) режима почв после воздействия пожаров по разным оценкам варьируют от 50 до 100 лет (Knorre et al., 2019; Kirduyanov et al., 2020).

Объекты исследования. Объектами исследования являются в общей сложности более 100 водотоков разных порядков, бассейны которых расположены в среднем течении р. Нижняя Тунгуска (рис. 5).

Размер бассейнов варьирует от первых сотен квадратных метров у временных водотоков верхний водосборных бассейнов до $268\,000\text{ км}^2$ у р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура. В качестве примера на рис. 6 приведена зависимость длины исследуемых водотоков от площади их водосборного бассейна.

В настоящей работе обобщены результаты мониторинга латерального стока углерода с 2006 по 2023 г., который проводился на основе 4 алгоритмов:

1. Массовое опробывание вод водотоков разных порядков в отдельные фазы гидрологического цикла: весеннее половодье, летняя межень, осенний период повышенного стока (> 90 водотоков) (рис. 6);

2. Регулярное опробывание рек Нижняя Тунгуска, Тембенчи, Таймура на гидрологических постах Среднесибирского УГМС и р. Кочечум (каждые 5–7 дней в период открытой воды и ежемесячно при ледоставе) (рис. 6).

3. Регулярное опробывание в период открытой воды малых водотоков (ручьи 5, 6, 9, 10, 11, 13, 14, 19 и 20), характеризующих разные стадии послепожарной сукцессии (каждые 5–7 дней) (рис. 7, а).

4. Квазинепрерывные наблюдения в период открытой воды с помощью логгеров-регистраторов (частота измерений физико-химических па-

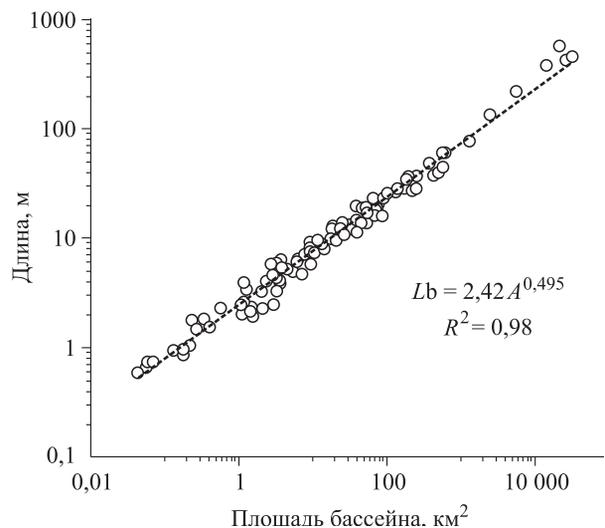


Рис. 6. Зависимость длины водотока (L_b) от площади бассейна (A) для тестовых водотоков разного порядка.

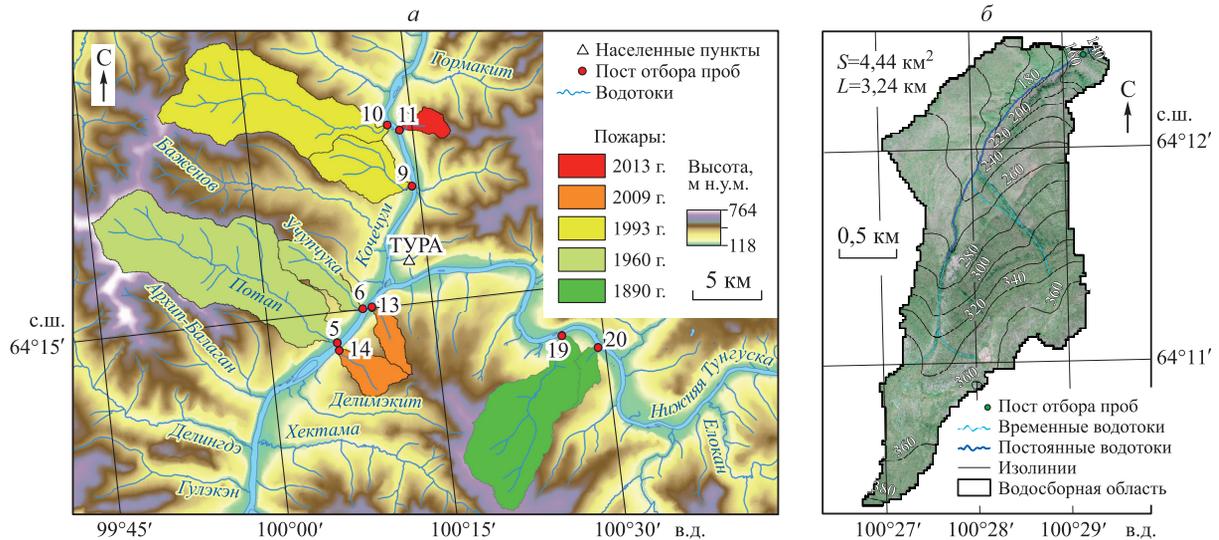


Рис. 7. Карта-схема водосборных бассейнов и постов мониторинга в устьевых частях водотоков, дренирующих водосборные бассейны, представляющие разные стадии послепожарной сукцессии (а) и бассейн условно контрольного водотока 20 (2-го порядка) с квазинепрерывными наблюдениями с помощью логгеров-регистраторов (б).

раметров 15 мин – 1 ч) на условно контрольном водотоке 2-го порядка (руч. 20, рис. 7, б).

Анализ форм углерода в речном стоке.

Опробывание вод осуществляется с глубины 10–20 см. Фильтрация образцов проводится, как правило, *in situ* через стекловолоконный фильтр GF/F (номинальный размер пор 0.7 мкм). До проведения анализов образцы хранятся в замороженном состоянии (при –18 °С).

Концентрации растворенного органического и неорганического углерода определяются в лаборатории на элементном анализаторе TOC vario cube (Elementar, Германия). Значения РОУ получены в режиме неотдуваемого органического углерода (NPOC). Аналитическая ошибка определения составляет, как правило, около 5 % для диапазона концентраций (1–5 мг С/л) и < 2 % при > 5 мг С/л.

Спектральные свойства растворенного органического вещества речного стока исследовались на спектрофотометре УФ-вид Сагу 100 (Agilent, США). Спектр поглощения растворов получен для диапазона 800–200 нм в толщине слоя 1 см (кварцевая кювета). В результате рассчитаны такие показатели, как удельное поглощение в УФ-области (SUVA, оптическое поглощение на длине волны 254 нм в слое 1 м, нормализованное на концентрацию РОУ, л/(м · мгС)) и спектральное отношение (SR, отношение углов наклона логарифмически преобразованных величин коэффициентов поглощения в двух областях спектра – $S_{275-295} : S_{350-400}$) (McKnight et al., 2001; Weishaar et al., 2003).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрология. Водное питание гидрографической сети формируется из атмосферных осадков, почвенных растворов и грунтовых вод. В условиях криолитозоны многолетняя мерзлота выступает в качестве барьера инфильтрации растворов, что определяет доминирование в гидрографе рек вклада атмосферных осадков и почвенных растворов, доля которых диктуется динамикой глубины СТС и эвапотранспирационными потерями. Важную роль в годовом стоке, особенно малых водотоков, играют штормовые атмосферные осадки, формирующие резкие пики водности в течение безморозного периода (рис. 8). В летнюю межень в годы с дефицитом осадков отмечается полное прекращение стока у водотоков низких порядков (до 3-го включительно), как показано на примере 2019 г. у водотока 20 на рис. 8. В осенний период наблюдается повышение водности водотоков всех порядков, что обусловлено в первую очередь снижением эвапотранспирационных потерь при переходе растительности в состояние покоя и понижением температур воздуха.

У подавляющего большинства малых рек (площади бассейна < 100 км²) в районе исследований отсутствует зимний сток в силу сплошного распространения мерзлоты на их бассейнах. При этом наличие стока и формирование наледей в зимний период являются индикатором развития сквозных таликов и питания водотоков

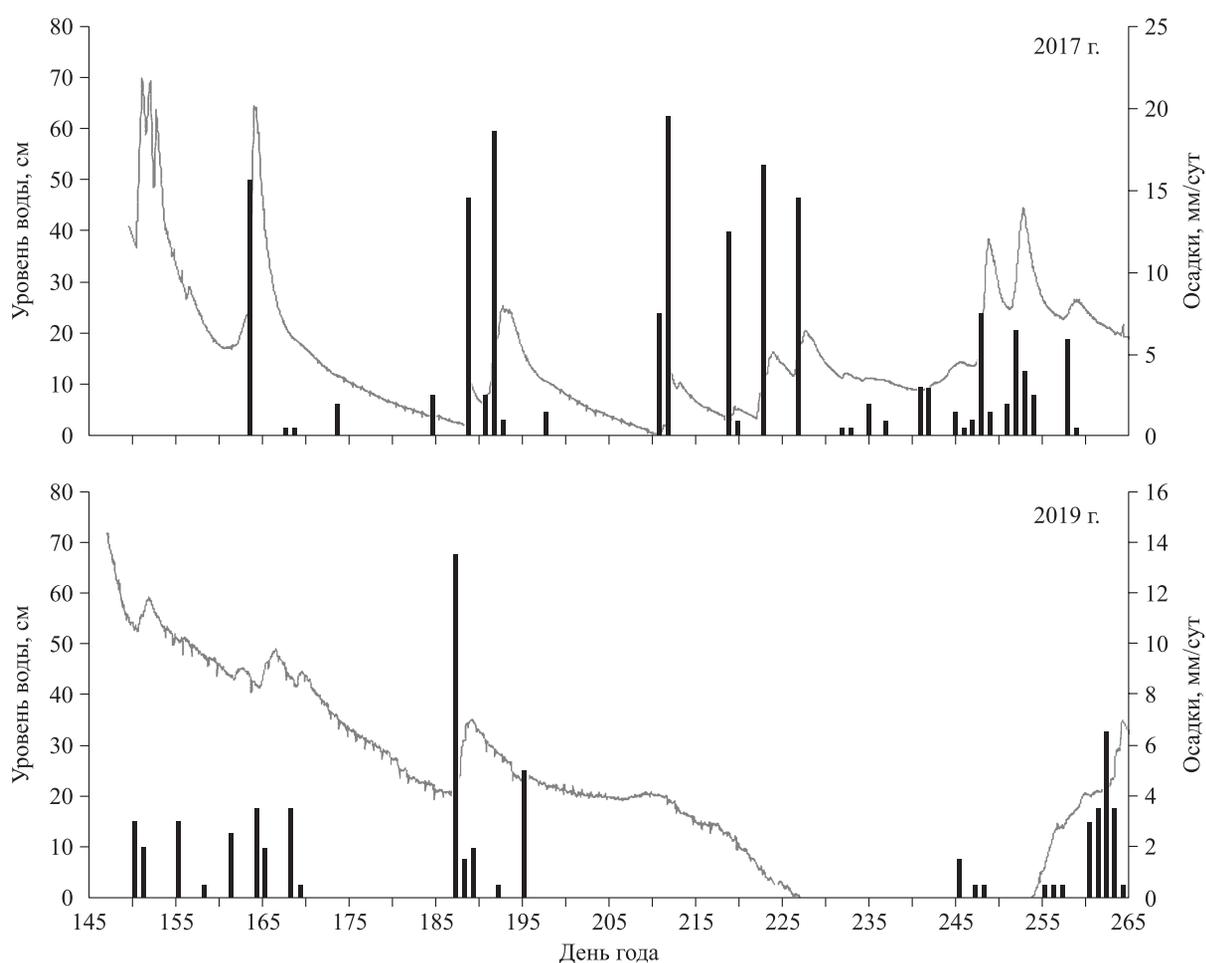


Рис. 8. Уровень воды в условно контрольном водотоке 20 и количество осадков, зарегистрированных на микрометеорологической мачте сети KrasFlux (KR-Tur), в контрастные по гидротермическим условиям 2017 и 2019 гг. (с 25 мая по 22 сентября).

сильноминерализованными водами (рассолами) эвапоритов, залегающих под чехлом изверженных и осадочных пород (Bagard et al., 2011; Parham et al., 2013).

Гидрологические исследования рек бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО) установили значительное увеличение стока по всей Панарктике с начала XX в. (Peterson et al., 2002; Ahmed et al., 2020), что объясняется интенсификацией гидрологического цикла (Rawlins et al., 2010). Полученные оценки роста речного стока евразийских рек в СЛО ($2.0 \pm 0.7 \text{ км}^3/\text{год}$ за 1936–1999 гг. (Peterson et al., 2002) позволяют прогнозировать долгосрочные изменения как гидрологического режима рек субарктических регионов, так и транспорта растворенного вещества (Tank et al., 2023). Для гидрологического поста «Тура» на р. Нижняя Тунгуска за весь период инструментальных наблюдений (1939–2023 гг.) также выявлен тренд возрастания годового стока реки со скоростью $0.25 \pm 0.05 \text{ км}^3/\text{год}$,

однако с тенденцией к его снижению или стабилизации в последние 25 лет (рис. 9).

Сходные закономерности отмечены для р. Енисей, вторым по величине притоком которого является р. Нижняя Тунгуска, а также р. Лена (Tank et al., 2023). Снижение стока рек Среднесибирского плоскогорья в последние два десятилетия может объясняться возрастанием площадей и интенсивности пожаров на этой территории (Ponomarev et al., 2020), поскольку эти параметры характеризуются значимой корреляцией с внутрисезонными и межгодовыми минимумами речного стока (Ponomarev et al., 2019).

Латеральный сток углерода. Распространение многолетнемерзлых пород на водосборных бассейнах оказывает ключевое влияние не только на гидрологический режим рек, но и на органическую и неорганическую гидрогеохимию региона исследований и Субарктики в целом. Многолетняя сезонная динамика речного стока и концентраций РОУ и РНУ прив-

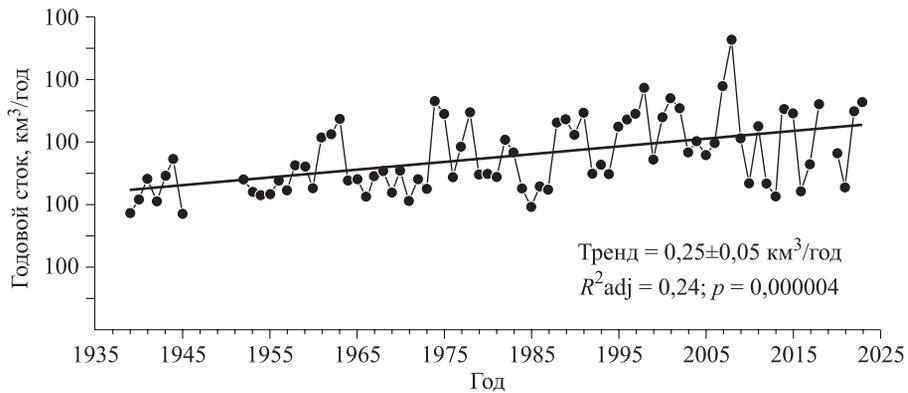


Рис. 9. Годовой сток р. Нижняя Тунгуска согласно наблюдениям на гидрологическом посту «Тура» Среднесибирского УГМС с 1939 по 2023 г.

дена на примере р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура на рис. 10.

Глубина залегания водонепроницаемого слоя мерзлоты обуславливает приуроченность источников питания рек к определенным горизонтам почв и/или горных пород. Так, при снеготаянии в весеннее половодье с минимальной инфильтрацией вод в почвы формирование реч-

ного стока происходит преимущественно в ее поверхностных слоях, богатых органическим веществом, что вызывает как резкое возрастание расходов воды, так и пиковые значения концентрации РОУ (рис. 10).

Обратная картина характерна поведению РНУ (рис. 10) и прочих неорганических соединений, концентрации которых минимальны

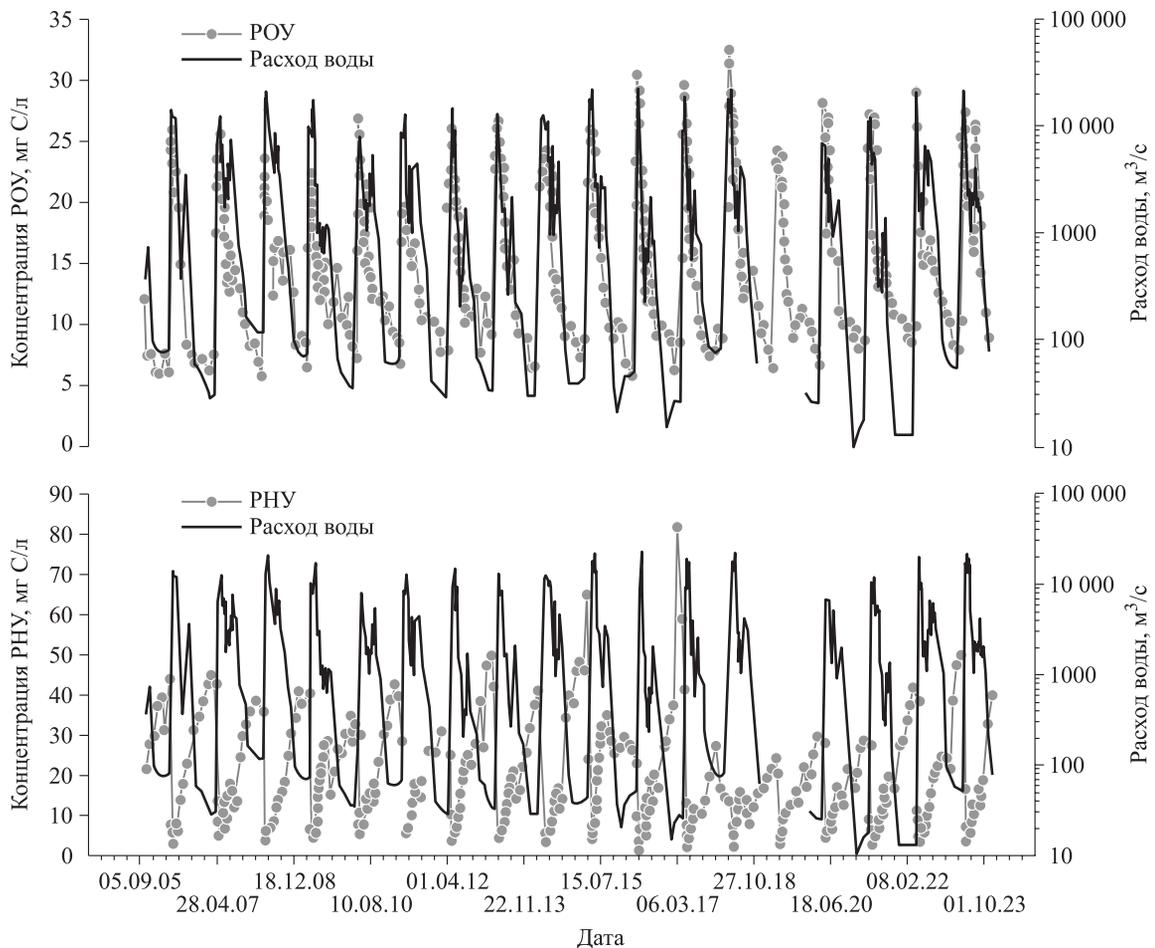


Рис. 10. Многолетний расход воды и концентрации РОУ и РНУ в стоке р. Нижняя Тунгуска в районе п. Тура с 2005 по 2023 г.

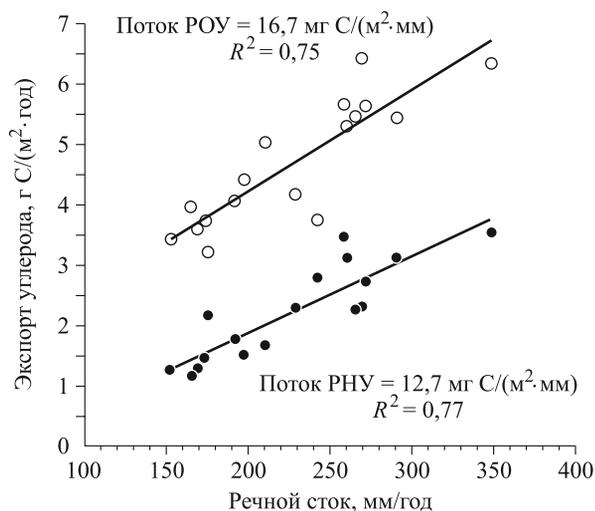


Рис. 11. Зависимость экспорта РОУ и РНУ с водосборного бассейна р. Нижняя Тунгуска от годового стока воды (2006–2023 гг.).

в эту фазу. Последующий рост мощности СТС в течение безморозного периода, определяя увеличение глубины инфильтрации растворов, время их удержания в почвенном профиле и возрастающие эвапотранспирационные потери воды, обуславливает постепенное снижение расходов воды и концентрации РОУ в речных водах и, наоборот, рост РНУ и прочих неорганических ионов. В зимний период для крупных водотоков, имеющих круглогодичный сток, таких как реки Нижняя Тунгуска, Кочечум, Таймура и т. д., характерны наименьшие концентрации РОУ и повышенные уровни РНУ, что связано с питанием подмерзлотными сильно минерализованными водами (Bagard et al., 2011; Kolosov et al., 2016).

Суммарный годовой экспорт углерода с бассейна р. Нижняя Тунгуска в точке мониторинга (створ в районе п. Тура, площадь дренируемой территории 268 000 км² (57 % всего бассейна)) за период наблюдений (2006–2023 гг.) варьировал от 3.22 до 6.44 гС/(м²·год) в случае РОУ и от 1.19 до 3.48 гС/(м²·год) для РНУ. Согласно проведенным оценкам, рост экспорта РОУ с бассейнов исследуемой территории на 1 мм прироста стока составляет около 17 мгС/(м²·год), для РНУ – около 13 мгС/(м²·год) соответственно (рис. 11).

Для рек, дренирующих северную часть Среднесибирского плоскогорья, таких как Тембенчи, Кочечум, Ямбухан и др., выявлены существенно более низкие уровни концентраций обеих форм растворенного углерода и количества их латерального стока, что уже показано нами ранее (Prokushkin A. S. et al., 2011). Полученные закономерности позволяют судить о лимитиро-

вании экспорта терригенного углерода из наземных ландшафтов исследуемой территории следующими факторами:

1 – ограничением по источникам в северной части Среднесибирского плоскогорья, вследствие низких температур бассейнам характерны:

а) низкая продуктивность растительного покрова и небольшие запасы потенциально мобилизуемого органического углерода;

б) замедленные скорости выветривания горных пород и незначительный пул почвенного неорганического углерода (гидрокарбонат-иона);

2 – ограничением по транспорту в восточной части Среднесибирского плоскогорья, низкие значения мобилизации доступных запасов обеих форм растворенного углерода определяются уменьшением количества осадков в условиях резко континентального климата.

Отдельным вопросом проводимых исследований является оценка количественных и качественных изменений, наблюдающихся в составе растворенного углерода в водотоках разных порядков, включая оценку влияния, которое оказывает пожарное воздействие на их бассейны. В последнем случае рассматривается и роль постпирогенного восстановления растительного покрова, изменений гидротермического режима почвы, динамики глубины сезонно-талого слоя, многолетней мерзлоты. На основе массового опробывания водотоков разных порядков, дренирующих бассейны с разной пожарной историей, в наиболее контрастные фазы гидрологического цикла (весеннее половодье и летняя межень) выявлено снижение концентраций РОУ и рост РНУ с увеличением площади водосборного бассейна и соответственно порядка водотока (рис. 12, а, б).

Наиболее выражены эти различия в период летней межени, что отражает рост вклада почвенных и подмерзлотных грунтовых вод в питание водотоков более крупных порядков.

Помимо изменения источников питания можно рассматривать также и ряд иных факторов, влияющих на количественные характеристики латерального стока углерода. Так, необходимо отметить возрастающую долю нарушенных площадей на территории бассейнов в результате пожаров (Ponomarev et al., 2019, 2020), что сказывается на снижении стока терригенного РОУ и, наоборот, на увеличении РНУ. С другой стороны, по существующим оценкам конечных водоемов, стока достигает лишь часть растворенного органического вещества, поступающего из почв в русловый сток, что обуслов-

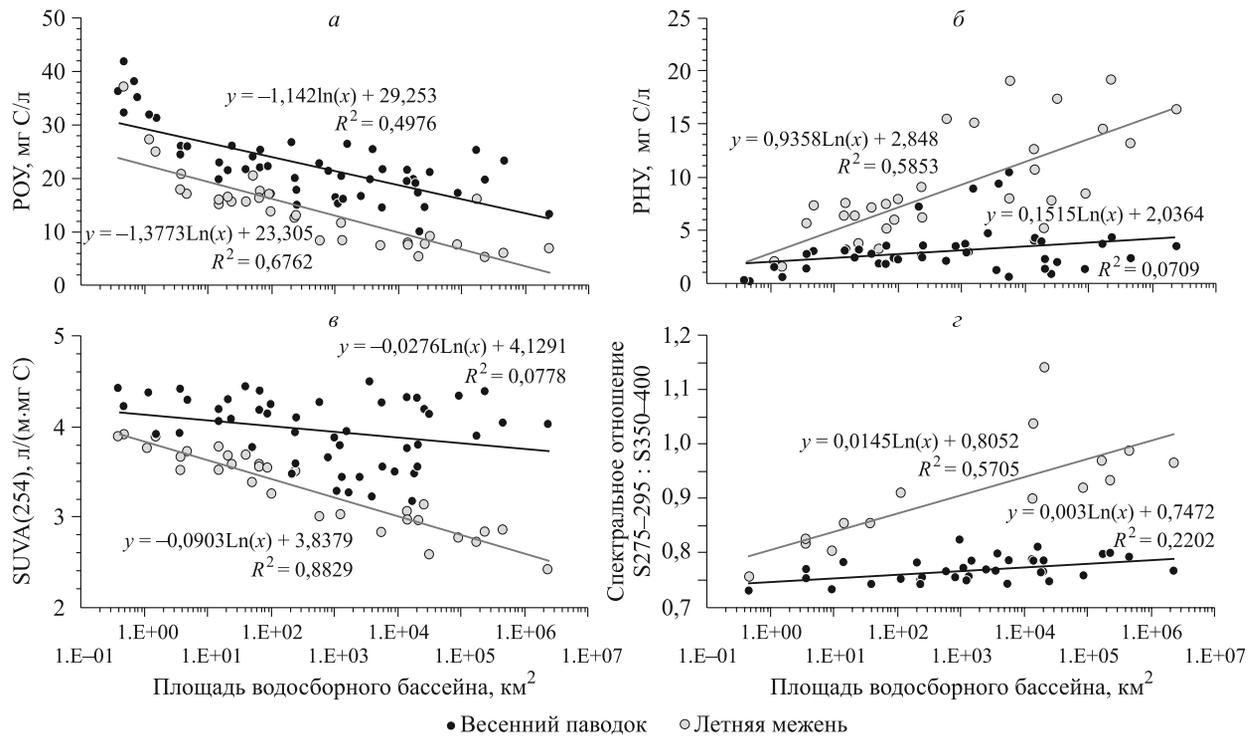


Рис. 12. Количественные и качественные характеристики растворенного углерода руслового стока рек разного порядка в зависимости от площади их водосборного бассейна: концентрации POY (а), PNU (б), спектральные характеристики POY – ароматизация (SUVA, в) и спектральное отношение (г).

лено возрастающей долей минерализованного терригенного органического вещества до CO_2 и CH_4 в процессе его транспорта в лотических системах. В результате наблюдается, как правило, перенасыщение вод (oversaturation) парниковыми газами и значительные эмиссионные потоки с поверхности водного зеркала, как это показано и в других ландшафтах Субарктики (Гончарова и др., 2023; Goncharova et al., 2023).

Качественный состав POY также претерпевает значительные изменения (параметры SUVA и SR), как в зависимости от фазы гидрологического цикла, так и размера речного бассейна. Формирование стока в весеннее половодье в богатых органическим веществом горизонтах почвы отражается на повышенных уровнях содержания ароматических (SUVA ~ 4 л/(м · мгС)), высокомолекулярных (SR < 0.8) органических соединений, свидетельствующих о поступлении в гидрографическую сеть условно «свежего» органического углерода. В летнюю межень в результате увеличения глубины СТС в гидрографическую сеть из наземных ландшафтов выносятся более трансформированное органическое вещество, о чем свидетельствует снижение ароматизации (до значений SUVA = 2.4 л/(м · мгС)) и молекулярной массы (до значений SR > 1.0). Как и в случае с количественными характери-

стиками, наиболее выраженные различия между бассейнами в качественном составе POY наблюдаются в период летней межени. В целом увеличение времени удержания POY в почвенном профиле ввиду его более глубокой инфильтрации и повышения доли адсорбированного С на минеральной матрице почвы определяет как рост его потерь в результате деструкции, так и продуцирование и экспорт почвенного углерода микробиологического происхождения. Вместе с тем пониженные значения ароматизации и молекулярного веса POY в водотоках крупных порядков могут свидетельствовать не только о поступлении сильно трансформированного аллохтонного POY (т. е. углерода терригенного происхождения), но также и о возрастающей роли автохтонного углерода, продуцируемого в водных экосистемах. Для оценки вклада этих форм углерода необходимо дальнейшее исследование специфических биохимических маркеров, характерных тем или иным звеньям пищевой цепи лотических систем.

Влияние пожарного воздействия на латеральный сток углерода исследуется на примере малых водотоков, дренирующих бассейны, находящиеся на разных стадиях послепожарной сукцессии – полностью пройденных пожаром в 2013 (11), 2009 (13, 14), 1993 (9, 10), 1960 (5, 6) и

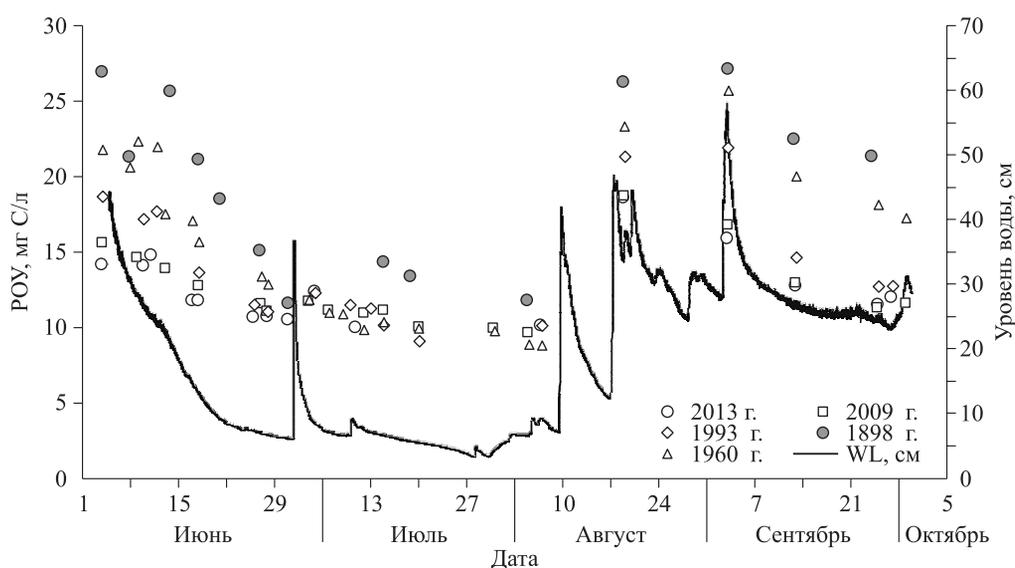


Рис. 13. Сезонная концентрация РОУ в стоке ручьев, дренирующих водосборные бассейны, полностью пройденные пожаром 1 (2013 г.), 5 (2009 г.), 21 (1993 г.), 54 (1960 г.) и 106 (1898 г.) лет назад на момент опробывания вод в 2014 г.

1898 гг. (19, 20 – условно контрольные). Следует отметить, что с 2006 по 2012 г. контрольным (> 100 лет после пожарного воздействия) водотоком был ручей 11, однако в 2013 г. его водосборный бассейн пройден пожаром, что, в свою очередь, позволило охарактеризовать непосредственное влияние пожара на поведение растворенного углерода в его стоке.

Результаты проводимого долговременного мониторинга свидетельствуют о резком снижении концентраций РОУ в стоке ручьев, подвергшихся пирогенному воздействию (рис. 13).

Наиболее выражены эти различия в периоды повышенной водности: в весеннее половодье снижение на 40–50 % и в меньшей степени – во время штормовых летних и осенних паводков (на 20–30 %). В меженный летний период наблюдается сужение различий между водотоками до 10–15 %, что наряду с близкими значениями качественного состава (по степени ароматизации и молекулярной массы) указывает на менее выраженное влияние пожаров на пул мобильного органического углерода в минеральной почве.

Восстановление исходных значений латерального стока углерода в форме РОУ и РНУ составляет не менее 60 лет и обусловлено восстановлением растительного покрова и соответственно запасов органического материала на поверхности почвы, а также мерзлотного режима (глубины СТС).

Основными факторами, оказывающими влияние на среднесезонные уровни содержания

РОУ в водотоках после пожарного воздействия, являются запасы органического вещества, аккумулярованные в органическом горизонте почвы и глубина сезонно-талого слоя на территории водосборного бассейна. Сгорание мохово-лишайникового покрова и верхнего органического горизонта почв, роль которых особенно выражена в периоды повышенной водности, определяет значительное сокращение запасов органического вещества в пределах бассейнов, и как следствие отражается в снижении среднесезонных концентраций РОУ в дренирующих их водотоках (рис. 14, а).

Обнаруженная обратная зависимость концентраций РОУ от глубины СТС обусловлена, вероятно, в большей степени тесной корреляцией последнего с запасами теплоизолирующего органического слоя и вызванного пожаром его уменьшения и последующими темпами восстановления (Прокушкин и др., 2011, 2021; Prokushkin S. G. et al., 2011, 2021; Palviainen et al., 2020).

Вместе с тем более ранние сроки начала оттаивания почвы и ее более высокая скорость в безморозный период на горях и пожарищах по сравнению с условно контрольными бассейнами, также вносят свой вклад в снижение уровней РОУ в водотоках (рис. 14, б).

Влияние пожаров на концентрации РНУ в водотоках района исследований имеет более сложное поведение, достигая максимальных значений через 20–25 лет после пирогенного воздействия, следуя динамике глубины СТС.

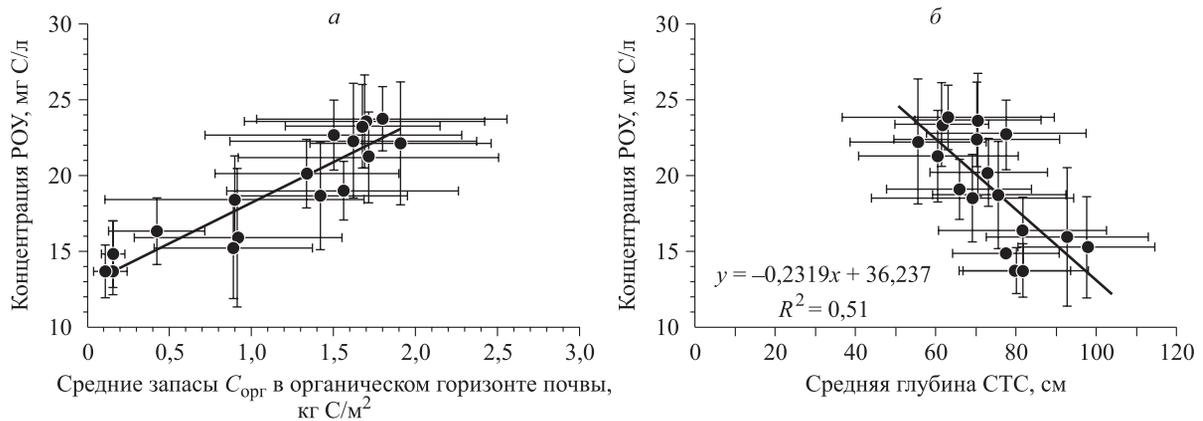


Рис. 14. Зависимость среднесезонной (июнь – сентябрь) концентрации РОУ в водотоках, дренирующих водосборные бассейны с разной пожарной историей (полностью пройденные пожарами от 1 до 118 лет назад), от усредненных для этих бассейнов запасов органического горизонта почвы (а) и глубины сезонно-талого слоя почвы (СТС) (б).

На рисунке данные для отдельного водотока представлены в формате среднее \pm стандартное отклонение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе бюджета углерода наибольшее внимание уделяется его запасам в наземных экосистемах и их обменным потокам парниковых газов с атмосферой. Вместе с тем детализация баланса углерода ландшафтов суши и особенно криолитозоны, где наблюдаются наиболее значимые тренды потепления, требует учета экспорта терригенного углерода за их пределы с латеральным стоком.

Потепление климата оказывает разнонаправленные воздействия на латеральный транспорт углерода. В качестве ключевых можно рассматривать процессы, связанные с деградацией многолетней мерзлоты и повышения почвенных температур.

Рост стока органического углерода прогнозируется как в результате оттаивания богатых $C_{\text{орг}}$ мерзлых толщ, так и увеличения продуктивности растительного покрова, а неорганического углерода – вследствие повышения скоростей выветривания горных пород и секвестрации атмосферного CO_2 .

Увеличение гидрологического транспорта, наблюдаемого в предыдущие десятилетия, остается спорным из-за существующих неопределенностей в прогнозах тенденций количества осадков, распределения их по сезонам года, и изменений в количественных параметрах других вероятных источников питания рек, таких как многолетняя мерзлота. Отрицательные прогнозы поведения РОУ связываются с увеличением глубины инфильтрации растворов с ростом СТС, что определяет сорбцию РОУ в почвенной толще и его минерализацию. Более того, значи-

тельная часть поступающего РОУ может подвергаться минерализации непосредственно в гидрографической сети и эмитироваться в атмосферу с поверхности водного зеркала как в виде CO_2 , так и метана. Прогнозируется возрастание стока углерода в форме РНУ (главным образом, гидрокарбонат-ион) в результате увеличения скоростей выветривания материнских пород и минерализации органического вещества, конечным продуктом которого является РНУ.

С другой стороны, возрастание площадей и интенсивности пожаров в результате потепления климата определяет существенную трансформацию латерального стока углерода. Основными факторами, оказывающими влияние на уровни содержания растворенного углерода в водотоках, после пожарного воздействия, являются снижение запасов органических горизонтов почв и увеличение глубины сезонно-талого слоя. При этом наблюдаемое сокращение стока рек в результате усиления пирогенного фактора будет определять общее снижение транспорта терригенного углерода из наземных ландшафтов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FWES-2024-0023 и реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гончарова О. Ю., Тимофеева М. В., Матышак Г. В. Диоксид углерода в почвенных, грунтовых и поверхностных водах арктических и бореальных регионов: роль, источники, методы определения (обзор) // Почвоведение. 2023. № 3. С. 321–338.
- Ершов Ю. И. Закономерности почвообразования в пределах Среднесибирского плоскогорья // Почвоведение. 1995. № 7. С. 805–810.
- Зырянова О. А., Абаимов А. П., Чихачева Т. Л. Влияние пожаров на лесообразовательный процесс в лиственных лесах Севера Сибири // Лесоведение. 2008. № 1. С. 3–10.
- Куричева О. А., Авилов В. К., Варлагин А. В., Гитарский М. Л., Дмитриченко А. А., Дюкарев Е. А., Загирова С. В., Замолодчиков Д. Г., Зырянов В. И., Карелин Д. В., Карсанаев С. В., Курганова И. Н., Лапина Е. Д., Максимов А. П., Максимов Т. Х., Мамкин В. В., Марунин А. С., Мигловец М. Н., Михайлов О. А., Панов А. В., Прокушкин А. С., Сиденко Н. В., Шилкин А. В., Курбатова Ю. А. Мониторинг экосистемных потоков парниковых газов на территории России: сеть RUFLUX // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 4. С. 512–535.
- Кушев С. Л., Леонов Б. Н. Рельеф и геологическое строение // Средняя Сибирь. М.: Наука, 1964. С. 23–82.
- Огуреева Г. Н., Микляева И. М., Сафронова И. Н., Юрковская Т. К. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий. Карта для высших учебных заведений М 1 : 8 000 000. М.: ЭКОР, 1999. Т. 2. На 2-х л.
- Ольчев А. В., Зырянов В. И., Сатосина Е. М., Фокеев Е. В., Мухартова Ю. В., Новенко Е. Ю., Прокушкин А. С. Сезонная изменчивость потоков диоксида углерода, явного и скрытого тепла в северотаежном лиственном лесу Средней Сибири по данным пульсационных измерений // Метеорол. и гидрол. 2022. № 10. С. 111–120.
- Прокушкин С. Г., Богданов В. В., Прокушкин А. С., Токарева И. В. Послепожарное восстановление органического вещества в напочвенном покрове лиственничников криолитозоны Центральной Эвенкии // Изв. РАН. Сер. биол. 2011. № 2. С. 227–234.
- Прокушкин С. Г., Зырянова О. А., Прокушкин А. С. Распределение запасов фитомассы и биогенных элементов в древостоях лиственницы Гмелина в Центральной Эвенкии (на примере малого водосборного бассейна) // Изв. РАН. Сер. биол. 2021. № 1. С. 93–102.
- Старцев В. В., Дымов А. А., Прокушкин А. С. Почвы постпирогенных лиственничников Средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // Почвоведение. 2017. № 8. С. 912–925.
- Abaimov A. P. Geographical distribution and genetics of Siberian larch species // Permafrost ecosystems: Siberian larch forests / A. Osawa, T. Kajimoto, O. A. Zyryanova, Y. Matsuura, R. Wein (Eds.). Springer Dordrecht, 2010. P. 41–58.
- Ahmed R., Prowse T., Dibike Y., Bonsal B., O'Neil H. Recent trends in freshwater influx to the Arctic Ocean from four major Arctic-draining rivers // Water. 2020. V. 12. N. 4. Article 1189. 13 p.
- Amon R. M. W., Rinehart A. J., Duan S., Louchouart P., Prokushkin A., Guggenberger G., Bauch D., Stedmon C., Raymond P. A., Holmes R. M., McClelland J. W., Peterson B. J., Walker S. A., Zhulidov A. V. Dissolved organic matter sources in large Arctic rivers // Geochim. Cosmochim. Acta. 2012. V. 94. P. 217–237.
- Bagard M. L., Chabaux F., Pokrovsky O. S., Viers J., Prokushkin A. S., Stille P., Rihs S., Schmit A. D., Dupre B. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. Iss. 12. P. 3335–3357.
- Drake T. W., Raymond P. A., Spencer R. G. M. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty // Limnol. Oceanogr. Lett. 2018. V. 3. Iss. 3. P. 132–142.
- Finlay J., Neff J., Zimov S., Davydova A., Davydov S. Snowmelt dominance of dissolved organic carbon in high-latitude watersheds: implications for characterization and flux of river DOC // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. Iss. 10. Article 25754.
- Goncharova O. Yu., Timofeeva M. V., Matyshak G. V. Carbon dioxide in soil, ground and surface waters of the northern regions: Role, sources, test methods (a review) // Euras. Soil Sci. 2023. V. 56. N. 3. P. 278–293 (Original Rus. text © O. Yu. Goncharova, M. V. Timofeeva, G. V. Matyshak, 2023, publ. in Pochvovedenie. 2023. N. 3. P. 321–338).
- Guggenberger G., Rodionov A., Shibistova O., Grabe M., Kasansky O. A., Fuchs H., Mikheeva N., Zrazhevskaya G., Flessa H. Storage and mobility of black carbon in permafrost soils of the forest tundra ecotone in Northern Siberia // Global Change Biol. 2008. V. 14. Iss. 6. P. 1367–1381.
- Holmes R. M., McClelland J. W., Peterson B. J., Tank S. E., Bulygina E., Eglinton T. I., Gordeev V. V., Gurtovaya T. Y., Raymond P. A., Repeta D. J., Staples R., Striegl R. G., Zhulidov A. V., Zimov S. A. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas // Estuaries and Coasts. 2012. V. 35. P. 369–382.
- Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R. B., Jones M., MacDonald G. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw // PNAS. 2020. V. 117. N. 34. P. 20438–20446.
- Hugelius G., Strauss J., Zubrzycki S., Harden J. W., Schuur E. A. G., Ping C. L. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // Biogeosciences. 2014. V. 11. Iss. 23. P. 6573–6593.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Dvinskaya M. L., Im S. T. Wildfires in northern Siberian larch dominated communities // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6. N. 4. Article 045208. 6 p.
- Kirdyanov A. V., Saurer M., Siegwolf R., Knorre A. A., Prokushkin A. S., Churakova (Sidorova) O. V., Fonti M. V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // Environ. Res. Lett. 2020. V. 15. N. 3. Article 034061. 11 p.
- Knorre A. A., Kirdyanov A. V., Prokushkin A. S., Krusic P. J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Sci. Total Environ. 2019. V. 652. P. 314–319.

- Kolosov R. A., Prokushkin A. S., Pokrovsky O. S. Major anion and cation fluxes from the Central Siberian Plateau watersheds with underlying permafrost // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2016. V. 48. N. 1. Article 012018. 6 p.
- MacLean R., Oswald M. W., Irons J. G. III and McDowell W. H. The effect of permafrost on stream biogeochemistry: a case study of two streams in the Alaskan (U.S.A.) taiga // Biogeochemistry. 1999. V. 47. Iss. 3. P. 239–267.
- McKnight D. M., Boyer E. W., Westerhoff P. K., Doran P. T., Kulbe T., Andersen D. T. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity // Limnol. Oceanogr. 2001. V. 46. Iss. 1. P. 38–48.
- Myers-Pigg A. N., Louchouart P., Amon R. M. W., Prokushkin A., Pierce K., Rubtsov A. Labile pyrogenic dissolved organic carbon in major Siberian Arctic rivers: Implications for wildfire-stream metabolic linkages // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. Iss. 2. P. 377–385.
- Ol'chev A. V., Zyryanov V. I., Satosina E. M., Fokeev E. V., Mukhartova Yu. V., Novenko E. Yu., Prokushkin A. S. Seasonal variability of carbon dioxide, sensible and latent heat fluxes in a northern taiga larch forest of Central Siberia for eddy covariance flux measurements // Rus. Meteorol. Hydrol. 2022. V. 47. Iss. 10. P. 804–811 (Original Rus. text © A. V. Ol'chev, V. I. Zyryanov, E. M. Satosina, E. V. Fokeev, Yu. V. Mukhartova, E. Yu. Novenko, A. S. Prokushkin, 2022, publ. in Meteorol. i gidrol. 2022. N. 10. P. 111–120).
- Palviainen M., Laurén A., Pumpanen J., Bergeron Y., Bond-Lamberty B., Larjavaara M., Kashian D. M., Köster K., Prokushkin A., Chen H. Y. H., Seedre M., Wardle D. A., Gundale M. J., Nilsson M.-C., Wang C., Berninger F. Decadal-scale recovery of carbon stocks after wildfires throughout the boreal forests // Global Biogeochem. Cycles. 2020. V. 34. Iss. 8. P. Article 6612. 17 p.
- Parham L. M., Prokushkin A. S., Pokrovsky O. S., Titov S. V., Grekova E., Shirokova L. S., McDowell W. H. Permafrost and fire as regulators of stream chemistry in basins of the Central Siberian Plateau // Biogeochemistry. 2013. V. 116. Iss. 1–3. P. 55–68.
- Peterson B. J., Holmes R. M., McClelland J. W., Vorosmarty C. J., Lammers R. B., Shiklomanov A. I., Shiklomanov I. A., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // Science. 2002. V. 298. N. 5601. P. 2171–2173.
- Ponomarev E., Masyagina O., Litvintsev K., Ponomareva T., Shvetsov E., Finnikov K. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // Forests. 2020. V. 11. N. 8. Article 790. 18 p.
- Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Prokushkin A. S. Intra-seasonal dynamics of river discharge and burned forest areas in Siberia // Water. 2019. V. 11. N. 6. Article 1146. 11 p.
- Prokushkin A. S., Gleixner G., McDowell W. H., Ruehlow S., Schulze E.-D. Source- and substrate-specific export of dissolved organic matter from permafrost-dominated forested watershed in Central Siberia // Global Biogeochem. Cycles. 2007. V. 21. Iss. 4. Article 2938. 12 p.
- Prokushkin A. S., Pokrovsky O. S., Shirokova L. S., Korts M. A., Viers J., Prokushkin S. G., Amon R., Guggenberger G., McDowell W. H. Sources and flux pattern of dissolved carbon in rivers of the Yenisey basin draining the Central Siberian Plateau // Environ. Res. Lett. 2011. V. 6. N. 4. Article 045212. 14 p.
- Prokushkin S. G., Bogdanov V. V., Prokushkin A. S., Tokareva I. V. Post-fire restoration of organic substance in the ground cover of the larch forests in permafrost zone of Central Evenkia // Biol. Bull. Rus. Acad. Sci. 2011. V. 38. Iss. 2. P. 183–190 (Original Rus. text © S. G. Prokushkin, V. V. Bogdanov, A. S. Prokushkin, I. V. Tokareva, 2011, publ. in Izv. RAN. Ser. Biol. 2011. N. 2. P. 227–234).
- Prokushkin S. G., Zyryanova O. A., Prokushkin A. S. Phytomass reserves and distribution of biogenic elements in Gmelin larch stands in Central Evenkia (Using the example of a small drainage basin) // Biol. Bull. Rus. Acad. Sci. 2021. V. 48. N. 1. P. 84–93 (Original Rus. text © S. G. Prokushkin, O. A. Zyryanova, A. S. Prokushkin, 2021, publ. in Izv. RAN. Ser. Biol. 2021. N. 1. P. 93–102).
- Rawlins M. A., Steele M., Holland M. M., Adam J. C., Cherry J. E., Francis J. A., Groisman P. Y., Hinzman L. D., Huntington T. G., Kane D. L., Kimball J. S., Kwok R., Lammers R. B., Lee C. M., Lettenmaier D. P., McDonald K. C., Podest E., Pundsack J. W., Rudels B., Serreze Mark C., Shiklomanov A., Skagseth O., Troy T. J., Vorosmarty C. J., Wensnahan M., Wood E. F., Woodgate R., Yang D., Zhang K., Zhang T. Analysis of the Arctic system for freshwater cycle intensification: observations and expectations // J. Clim. 2010. V. 23. Iss. 21. P. 5715–5737.
- Startsev V. V., Dymov A. A., Prokushkin A. S. Soils of post-pyrogenic larch stands in Central Siberia: morphology, physicochemical properties, and specificity of soil organic matter // Euras. Soil Sci. 2017. V. 50. N. 8. P. 885–897 (Original Rus. text © V. V. Startsev, A. A. Dymov, A. S. Prokushkin, 2017, publ. in Pochvovedenie. 2017. N. 8. P. 912–925).
- Tank S. E., McClelland J. W., Spencer R. G. M. Recent trends in the chemistry of major northern rivers signal widespread Arctic change // Nature Geosci. 2023. V. 16. Iss. 9. P. 789–796.
- Tarnocai C., Canadell J. G., Schuur E. A. G., Kuhry P., Mazhitova G., Zimov S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // Global Biogeochem. Cycles. 2009. V. 23. Iss. 2. Article 3327. 11 p.
- Tchebakova N. M., Parfenova E. I., Soja A. J. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate // Environ. Res. Lett. 2009. V. 4. N. 4. Article 045013. 9 p.
- Vygodskaya N. N., Milyukova I., Varlagin A., Tatarinov F., Sogachev A., Kobak K. I., Desyatkin R., Bauer G., Hollinger D. Y., Kelliher F. M., Schulze E.-D. Leaf conductance and CO₂ assimilation of Larix gmelinii growing in an eastern Siberian boreal forest // Tree Physiol. 1997. N. 17. Iss. 10. P. 607–615.
- Weishaar J. L., Aiken G. R., Bergamaschi B. A., Fram M. S., Fujii R. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon // Environ. Sci. Technol. 2003. V. 37. Iss. 20. P. 4702–4708.

LATERAL CARBON FLUX IN THE CRYOLITHOZONE OF CENTRAL SIBERIA

**A. S. Prokushkin^{1,2}, T. N. Geis^{1,2}, R. A. Kolosov¹, M. A. Korets¹, A. V. Panov¹,
D. A. Polosukhina^{1,2}, M. P. Prokushkina², S. V. Titov¹, I. V. Tokareva¹,
N. V. Sidenko¹, Yu. V. Shamonina¹, S. G. Prokushkin¹**

¹ *V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

² *Siberian Federal University
Prospekt Svobodny, 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation*

E-mail: prokushkin@ksc.krasn.ru, geys.00@mail.ru, kolosov.ra@ksc.krasn.ru, mik@ksc.krasn.ru,
alexey.v.panov@gmail.com, polosukhina@ksc.krasn.ru, Mprokushkina@sfu-kras.ru, titov-sergey@mail.ru,
gavrilenko@ksc.krasn.ru, nikita.v.sidenko@gmail.com, shamonina@ksc.krasn.ru, stanislav@ksc.krasn.ru

Quantitative assessments of the carbon balance of terrestrial landscapes and, specifically the permafrost zone, where the most significant warming trends are observed, require taking into account the export of terrigenous carbon beyond their boundaries with lateral flow. The paper presents the results of long-term monitoring of intraseasonal and interannual fluctuations in the concentrations of dissolved organic (DOC) and inorganic (DIC) carbon in the hydrographic network of the Central Siberian Plateau, carried out on the basis of the Evenkian field station of the V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (Tura settlement). Research is being carried out on more than 100 streams and rivers of various orders in the middle reaches of the Lower Tunguska River (62–66°N, 96–102°E) based on regular measurements of the concentrations of all forms of carbon, as well as quasi-continuous monitoring of the physical and chemical parameters using specific sensors and automatic loggers. It has been shown that the main limiting factors of lateral carbon flux within the Central Siberian Plateau at present are: 1) stocks of potentially mobilizable organic carbon in terrestrial landscapes and 2) amount of precipitation in a sharply continental climate. An increase in the DOC flux is predicted both as a result of thawing of C-rich frozen deposits and an increase in the productivity of plant cover, and inorganic carbon – as a result of increased rates of silicate rock weathering and sequestration of atmospheric CO₂. Negative predictions of DOC behaviour are associated with an increase in the depth of infiltration of solutes with an increase in the seasonally thawed soil layer, which determines the sorption of DOC in the soil column and its microbiological destruction. An increase in the area and intensity of fires as a result of climate warming determines a significant transformation of the lateral carbon flux. At the same time, the observed reduction in river flow as a result of an increase in the pyrogenic factor will determine the overall decrease in the transport of terrigenous carbon from terrestrial landscapes.

Keywords: *carbon, lateral flow, watercourses of different orders, fires, Central Siberian Plateau.*

How to cite: *Prokushkin A. S., Geis T. N., Kolosov R. A., Korets M. A., Panov A. V., Polosukhina D. A., Prokushkina M. P., Titov S. V., Tokareva I. V., Sidenko N. V., Shamonina Yu. V., Prokushkin S. G. Lateral carbon flux in the cryolithozone of central Siberia // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2024. N. 3. P. 67–82 (in Russian with English abstract and references).*