
ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 579.68;551.34

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТАВА ВОДЫ В ВОДОТОКАХ БАСЕЙНА РЕКИ БУРЕЯ НА УЧАСТКАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

© 2022 г. Л. М. Кондратьева¹, З. Н. Литвиненко^{1,*}, Д. В. Андреева¹, Е. М. Голубева²

¹ Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН,
ул. Дикопольцева, 56, г. Хабаровск, 680000 Россия

² Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина Дальневосточного отделения РАН
ул. Дикопольцева, 56, г. Хабаровск, 680000 Россия

*E-mail: zoyana2003@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 16.03.2022 г.

Принята к публикации 17.03.2022 г.

Представлены результаты исследования состава воды в притоках разного порядка р. Бурей (Дальний Восток) с учетом геоэкологических процессов трансформации органического углерода в активном слое биосферы (сезонно оттаивающие/замерзающие почвы) на границе с многолетней мерзлотой. Для оценки изменения состава воды использованы спектральная характеристика растворимых органических веществ (РОВ) в водных экстрактах почв из разных горизонтов сезонно-талого слоя и активность микробных комплексов по отношению к гуминовым веществам. Установлено, что определяющую роль в составе РОВ играли микробные комплексы активного слоя и глубина залегания горизонта многолетнемерзлых пород. Экспериментально показано, что при одинаковой температуре качественный состав РОВ в водотоках при таянии мерзлых пород может существенно отличаться.

Ключевые слова: состав воды, многолетняя мерзлота, активный слой, микробные комплексы, гуминовые вещества

DOI: 10.31857/S0869780922030031

ВВЕДЕНИЕ

В связи с изменением климата особое внимание уделяется факторам, определяющим динамику геохимических процессов в активном слое биосферы (сезонно оттаивающие/замерзающие почвы). Существуют геологические, геоморфологические, погодные условия, связанные с атмосферными осадками, которые определяют различия в дифференциации и глубине оттаивания мерзлоты в разных регионах. Наши исследования проведены в бассейне р. Бурей на участках многолетней мерзлоты в пределах уникальных ландшафтных единиц — марей. Они формируются на заболоченных, плохо дренируемых участках, где активный слой почв контактирует с многолетнемерзлыми породами, и оказывают непосредственное влияние на качество поверхностных вод.

В толщах многолетнемерзлых пород (ММП) арктических и субарктических регионов сосредоточены огромные запасы углерода, которые в условиях продолжающегося изменения климата могут быть мобилизованы и преобразованы в парниковые газы [31]. Важным механизмом этого

преобразования является микробный метаболизм [27], в результате которого водные экосистемы получают растворенные и нерастворенные формы органического углерода из тающих мерзлых почв. В последние годы регистрируют сильное влияние деградации водосборов с многолетней мерзлотой на состояние водных экосистем, с вероятным сдвигом в сторону доминирования трогического органического углерода [36].

Таяние мерзлых почв и грунтов является наиболее важным геоэкологическим фактором, влияющим на состав поверхностных вод, характеристики растворимых органических веществ (РОВ) и особенности их трансформации в водных экосистемах и регулирующих гидрологическую связь между торфяниками и водотоками [23, 26].

Особое внимание уделяется рекам, на водосборе которых происходит сезонное оттаивание ММП, особенно в, так называемом, активном слое (слой почвы, который оттаивает с весны до осени и замерзает зимой) [16, 20]. Предполагается, что сезонная динамика таяния почв влияет на концентрации многих химических веществ в

реках, долины которых находятся в зонах распространения многолетней мерзлоты [9], в том числе растворенного железа ($\text{Fe}_{\text{раств}}$), вступающего во взаимодействие с гуминовыми веществами (гуминовые и фульвокислоты) [18]. Наиболее существенные изменения качества воды и состава РОВ наблюдали в реках Западной Сибири, русла которых расположены в низменностях богатых торфяниками, на границе многолетней мерзлоты [13]. Миграция элементов в реках этого региона также определяется преобладанием торфяных почв, которые являются источником поступления РОВ [25].

Формирующиеся в пределах заболоченных участков малые водотоки имеют повышенную концентрацию многих ионов Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_2^- , высокую минерализацию и значительное содержание органического вещества (ОВ). В топях и протоках микроэлементы сорбируются в достаточно больших количествах на тонкодисперсных частицах детрита, гуминовых кислотах, в меньшей степени микроэлементы выводятся из раствора и концентрируются в верховых частях болот на торфах [4].

Известно, что разные типы торфяников отличаются по составу РОВ поровых вод [34]: в богатых питательными веществами болотах в зоне прерывистой многолетней мерзлоты входит меньше ароматических соединений, чем на торфяных плато [28]. Высокая биоразлагаемость РОВ связана с присутствием азотсодержащих ОВ (включая белки и аминокислоты) [10]. Сильное влияние на различия в составе РОВ оказывают происходящие биогеохимические процессы в незамерзших или оттаивающих почвах. При дальнейшем потеплении климата оценка изменчивости состава РОВ становится все более актуальной в связи с ростом продолжительности оттаивания [21]. Глубина активного слоя и локализация кровли ММП определяют физико-химические свойства почвы, оказывают преимущественное влияние на разнообразие и вертикальное распределение микробных комплексов (МК), участвующих в трансформации растительных органических веществ [11].

Микробиологические исследования многолетнемерзлых почв в Арктике и Антарктике с помощью молекулярных исследований структуры сообществ микроорганизмов и методов культивирования на питательных средах показали необходимость определения функционально активных (жизнеспособных) клеток [30, 35]. Использование только молекулярно-генетических методов и библиотеки клонов вносит ошибку в интерпретацию данных за счет того, что может быть идентифицирована нефункциональная часть микробного сообщества [15]. Из многолетнемерзлых почв на Шпицбергене было выделено 158 штам-

мов чистых культур, отличающихся по своей биохимической активности [14]. Среди них преобладали представители рода *Cellulomonas*, что может быть связано с относительно высоким количеством растительных остатков, которые обеспечивают селективный отбор бактерий с целлюлолитическими способностями. Однако, значительную долю бактерий (69%), выделенных из многолетнемерзлых почв Канады, составляли спорообразующие бактерии [32]. Эти данные указывают на то, что в многолетнемерзлых почвах и грунтах из разных географических регионов структура сообществ и их активность могут существенно отличаться.

Первые исследования, проведенные на водосборе с распространением многолетней мерзлоты в бассейне р. Бурей, были связаны с изучением сезонного изменения концентраций $\text{Fe}_{\text{раств}}$ и РОВ в реках и поровых водах почвенного покрова. Было установлено, что интенсивность оттаивания мерзлых почв оказывает существенное влияние на концентрацию растворенного железа в водотоках. Важным контролирующим фактором механизма его поступления из почвы в речные воды выступали гуминовые вещества [33]. Согласно выполненным исследованиям, многолетнемерзлые заболоченные участки в долине р. Тырма (один из крупных притоков Буреи) играют важную роль в обеспечении многих водотоков РОВ в ответ на сезонные гидрологические явления (весеннее таяние снега, летние осадки) и глубину оттаивания почвы. Существует гипотеза о том, что в результате транзита по водотокам $\text{Fe}_{\text{раств}}$ выносятся в р. Амур, а затем в прибрежные морские акватории [22].

Цель настоящих исследований состояла в комплексной оценке состава поверхностных вод в притоках р. Бурей на заболоченных участках (марях) в зависимости от глубины залегания ММП с использованием спектрофотометрического метода определения состава РОВ и экспериментальных исследований активности микробных комплексов активного слоя по отношению к гуминовым веществам.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные факторы, определяющие климат в Приамурье и бассейне р. Бурей: географическое положение на восточной окраине обширного Азиатского континента, граничащего с Тихим океаном, сложная орография, муссонный характер циркуляции атмосферы и циклоническая деятельность [1].

В бассейне Буреи, особенно в северной его части, встречаются ММП и выделяются три геокриологических района. *Первый* из районов включает в основном северную часть бассейна,

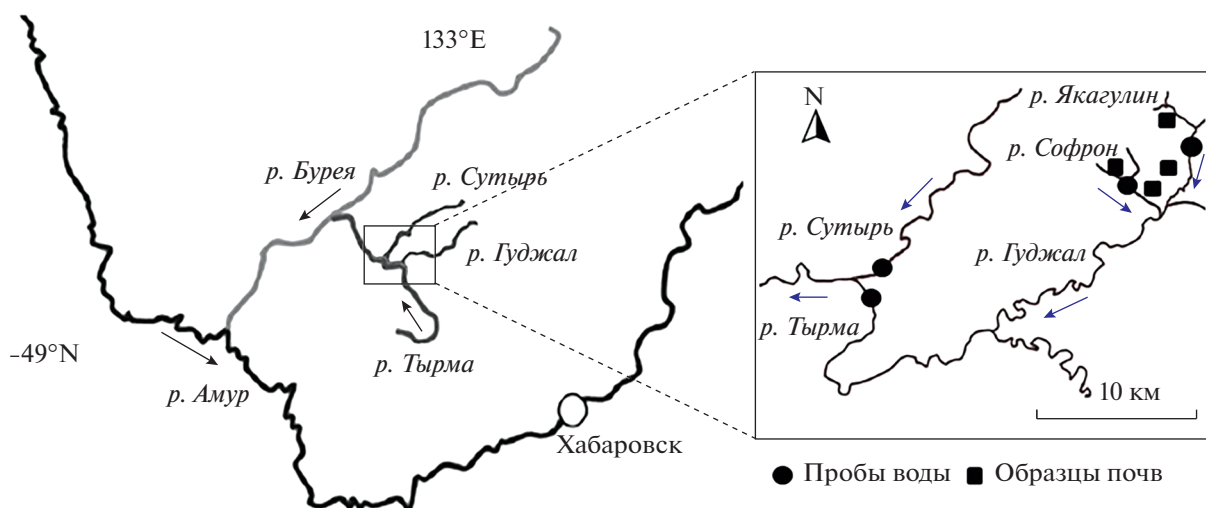


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб воды и почв в бассейне р. Тырма.

характеризуется преимущественно сплошным типом распространения ММП до 90–95%, слабо прерывистым (70–95%), а по долинам и нижним склонам рек Акишма, Ниман, Правая и Левая Бурея – сильно прерывистым (50–75%). Мощность ММП доходит до 300–500, 100–200 и 50–100 м соответственно. Температура этих типов ММП составляет от -1.5 до -2°C . Второй район охватывает центральную часть водосбора Буреи. Район отличается преобладающим распространением ММП сильно прерывистого типа (долины и нижние части склонов долин рек) и массивно-островного типа (25–50% территории). Мощность первого типа варьирует в пределах 50–100 м, второго – не превышает 50 м. Третий район в южной части водосбора Буреи представлен бассейнами ее притоков: Тырма, Дубликан, Ягдынья, Верхний и Нижний Мельгин. Для них характерно распространение массивно-островного (долины рек) и островного типов ММП. В самой южной части бассейна Буреи развит редкоостровной тип ММП толщиной менее 50 м.

За период наблюдений 1936–2008 гг. в приземной температуре воздуха в бассейне Буреи выявлен положительный линейный тренд роста среднегодовой температуры воздуха со скоростью 0.23°C за 10 лет [5]. Наибольшее потепление по сезонам года отмечается в зимне-весенний период (0.30 – $0.47^{\circ}\text{C}/10$ лет); оно в 2–3 раза превышает потепление летом и осенью. Выявленные тенденции потепления климата показывают, что к 2050 г. среднегодовая температура воздуха в бассейне Буреи может увеличиться на 0.9 – 1.9°C , что равносильно смещению природных зон на 100–200 км к северу, а и в горных районах на 100–200 м вверх по вертикали. Потепление климата будет способствовать деградации многолетней мерзлоты,

особенно на южной границе ее распространения [1].

Для Приамурья характерны уникальные ландшафтные единицы – мари. Они распространены в пределах аккумулятивных и аккумулятивно-денудационных междуречий, на заболоченных, наиболее выровненных плоских поверхностях, пологих склонах с близким залеганием многолетней мерзлоты. На таких поверхностях образуются торфяно-болотные и лугово-болотные почвы, где растительность представлена редкими лиственными кустарниками, ерниками и болотными мхами. По экологическим условиям мари близки к лесотундре [2].

Важным фактором формирования качества воды в основных притоках р. Бурея является глубина залегания многолетней мерзлоты. Один из крупных притоков Буреи – р. Тырма, площадь ее водосбора составляет $15\,100\text{ км}^2$, длина – 334 км. Основными притоками являются р. Яурин (площадь водосбора 3160 км^2 , длина 195 км), р. Гуджал (2750 км^2 и 171 км соответственно) и р. Сутырь (2160 км^2 и 174 км). Наблюдения Росгидромета за химическим составом воды осуществляются только на р. Яурин. Гидрохимическая изученность р. Тырма и ее притоков низкая, первые исследования в ее бассейне были начаты в 2015 г. [6].

В октябре 2017 г. были проведены комплексные исследования в бассейнах р. Бурея и ее притоков: Тырма, Сутырь, Софрон и Якагулин (рис. 1) с использованием спектрофотометрических и микробиологических методов. Пробы воды отбирали батометром с поверхностного слоя.

Почвенные разрезы были заложены на левом пологом берегу р. Софрон, где мерзлота отсутствовала, а также на участках с разной глубиной залегания ММП в долинах рек Софрон (на глуби-

не 40 см) и Якагулин (на глубине 60 см). Согласно ранее проведенным исследованиям, в долине р. Софрон [33] на заболоченных участках (марях) содержание ОВ изменялось с глубиной по-разному: увеличивалось или уменьшалось. Например, на пологих склонах наблюдали скопление ОВ на глубине 10–20 см, на вершине холмов регистрировали повышенное содержание ОВ в верхнем слое, с глубиной содержание ОВ снижалось в 3–6 раз.

Оттаивание мерзлых пород до глубины 10 см на участке, расположенном недалеко от левого берега р. Софрон, завершилось 24 мая, а на глубине 25 см только 15 июня. На участке, расположенном на границе долины р. Софрон и склона холма, оттаивание верхнего слоя происходило на месяц раньше. На этом участке 1 июля температура почвы на глубине 10 и 25 см составляла 9.1 и 4.2°C соответственно. На участках, где мерзлота отсутствовала, максимальная температура почв по глубинам изменялась следующим образом (10 см – 13.1°C; 25 см – 9.6°C; 50 см – 7.9°C).

Для моделирования выноса РОВ в водотоки из переувлажненных почв во время интенсивных осадков и таяния мерзлых пород была проведена серия экспериментальных исследований с использованием водных экстрактов почв, отобранных из разных горизонтов, в том числе контактирующих с многолетней мерзлотой. Приготовление водных вытяжек почв проводили следующим образом: 1 г субстрата вносили в 100 мл стерильной дистиллированной воды, встряхивали автоматически на шейкере (150 об/мин) в течение 20 минут. Затем почвенную суспензию выдерживали в течение 10 сут в холодильнике при 2°C и использовали для спектральных и микробиологических исследований.

Определение содержания ОВ в водных экстрактах почвенных субстратов, отобранных в долинах малых водотоков и на заболоченных участках в бассейне р. Тырма, проводили спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Shimadzu UV-3600). Суммарное содержание растворенных ОВ ($ОВ_{254}$) определяли при длине волны $\lambda = 254$ нм, а ароматических соединений ($ОВ_{275}$) при $\lambda = 275$ нм [17]. Для определения особенностей микробиологической трансформации гуминовых веществ микроорганизмами активного слоя при разных температурах (2 и 23°C) использовали гумат натрия (ГNa), активность процесса определяли по изменению значений абсорбции культуральной жидкости (КЖ) на 30-е сутки при разных длинах волн: $\lambda = 254$ нм; $\lambda = 275$ нм.

Численность культивируемых гетеротрофных бактерий (КГБ) в пробах воды и почвенных вытяжках определяли на рыбо-пептонном агаре

(РПА), разбавленном в 10 раз (РПА:10); аммонифицирующих бактерий (АМБ), участвующих в процессе аммонификации ОВ, выращивали на РПА; нитрифицирующих бактерий (НБ), усваивающих аммонийный азот и утилизирующих в качестве источника углерода крахмал, учитывали на крахмал-аммиачном агаре (КАА). Численность выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ/мл для воды и КОЕ/г для почвы) [3].

Потенциальную микробную активность по отношению к гуминовым веществам (0.2 г/л ГNa) определяли по результатам их культивирования на среде М9 следующего состава (г/л): дистиллированная вода – 1, KH_2PO_4 – 1.33; K_2HPO_4 – 2.67; NH_4Cl – 1; Na_2SO_4 – 2; KNO_3 – 2; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0.001; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0.1.

Определение литогенных элементов в водном экстракте почв проводили после отделения крупнозернистых частиц путем фильтрации через бумажный фильтр “синяя лента” (диаметр пор 2–3 мкм). Фильтрат переносили в полипропиленовые пробирки на 50 мл и консервировали свежеприготовленной 1% HNO_3 . В фильтрате, представляющем комплекс растворенных и коллоидных форм химических элементов, определяли их общее содержание методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Elan 9000 (Perkin Elmer, Канада) в Хабаровском инновационно-аналитическом центре коллективного пользования ИТиГ ДВО РАН по стандартным методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из крупных притоков р. Буря (р. Тырма) и ее притоки характеризуются хорошо выраженной сезонной динамикой стока основных ионов, обусловленной изменениями водного режима и наличием ММП. Подробные гидрохимические исследования притоков р. Буря показали [7], что состав воды зависит от водного режима, состава подстилающих пород и растительного покрова. Содержание РОВ было определено традиционными в гидрохимии методами по величине перманганатной окисляемости (ПО), химическому потреблению кислорода (ХПК) и цветности (Цв). Принято считать, что цветность характеризует водорастворимые окрашенные гумусовые соединения почв и болот, а по величине ПО оцениваются бесцветные и мало окрашенные вещества, образующиеся в результате продукционно-деструкционных процессов; ХПК считают индикаторным показателем присутствия стойких трудно минерализуемых ОВ. Установлено [7], что максимальное содержание ОВ, отмеченное во время паводков в водотоках бассейна р. Буря, дренирующих заболоченные территории, достигали зна-

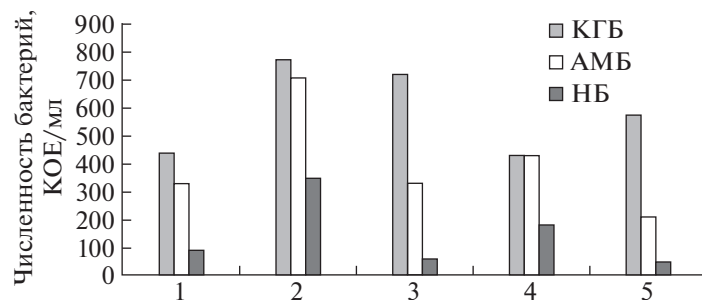


Рис. 2. Изменение численности физиологических групп культивируемых бактерий в основных притоках р. Тырма: КГБ — культивируемые гетеротрофные бактерии, АМБ — аммонифицирующие бактерии, НБ — нитрифицирующие бактерии; 1 — р. Тырма, 2 — р. Сутырь, 3 — р. Софрон; 4-5 — р. Якагулин, пробы от: 4 — 6.10.2017 г., 5 — 14.10.2017 г.

чений ПО 13.7–16.2 мгО/л¹ при цветности 86–103°Pt–Со шкалы. Величины отношения Цв/ПО в водотоках отличались незначительно (6.3–6.4). По мнению авторов, это свидетельствует о близком уровне трофности этих рек. В маловодные годы цветность воды в р. Тырма снижалась в 2 раза.

Проведенные исследования свидетельствуют, что основным отличительным признаком вод в р. Тырма и ее притоков является различие в содержании РОВ. Максимальное содержание ОВ по двум показателям (ПО, ХПК) установлено в р. Тырма. Однако по минимальным значениям этих показателей обнаружены существенные различия. Так минимальное количество соединений по ХПК было установлено в р. Сутырь, а по значениям ПО — в р. Якагулин.

Содержание ОВ разного генезиса зависело от динамики биогеохимических процессов в почвенных горизонтах, в том числе контактирующих с ММП. Индикатором этих процессов выступало растворенное железо ($Fe_{\text{раств}}$), концентрация которого в поровых водах изменялась по сезонам и горизонтам [33]. Так, сезонное оттаивание почвы вниз по профилю от 20 до 40 см происходило в мае на гребнях и склонах холмов, а в июне в долинах. Образование $Fe_{\text{раств}}$ на этих глубинах происходило через 2–3 месяца после оттаивания. Концентрации $Fe_{\text{раств}}$ на глубинах 20 и 40 см в многолетнемерзлых почвах на марях с августа по сентябрь быстро увеличивались до 2.00–6.90 мг/л. При отсутствии мерзлых пород такого увеличения концентраций $Fe_{\text{раств}}$ не наблюдали. В конце октября, когда почвы начинали промерзать на поверхности, концентрации $Fe_{\text{раств}}$ в поровых водах снижались до менее 1.00 мг/л.

¹ ПДК перманганатной окисляемости для питьевой воды составляет 5 мгО/л. Нормы качества питьевой воды СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода.
URL: <https://eksorb.com/analiz-vody/osnovnye-pokazateli/>

Микробиологические исследования в долине р. Тырма и ее притоках

Органические вещества, поступающие в речные экосистемы в период таяния снега, весенне-осенних осадков и таянии ММП, вовлекаются в биогеохимические процессы при участии микроорганизмов-деструкторов. Благодаря разнообразию состава ОВ и физико-химических условий формируются сложные микробные комплексы (МК), участвующие в круговороте углерода, азота и ключевых элементов обеспечивающих стабильность экосистем.

Согласно микробиологическим исследованиям в осенний период максимальная численность трех физиологических групп бактерий, принимающих участие в трансформации и деструкции ОВ, была установлена в р. Сутырь (рис. 2). Водотоки отличались по соотношению физиологических групп бактерий-деструкторов. Это может быть связано с разным составом ОВ. В реках Тырма и Софрон численность бактерий, участвующих в деструкции азотсодержащих ОВ (АМБ, НБ), была сопоставимой, но ниже, чем в р. Сутырь. На примере р. Якагулин, в которой пробы воды отбирали дважды при разном водном режиме, было показано, что структура МК существенно изменялась. При повышении водности увеличивалась общая численность культивируемых гетеротрофных бактерий (КГБ), однако снижалась численность бактерий, участвующих в цикле азота (аммонификаторы, нитрификаторы). Такая закономерность может быть связана с поступлением в речную сеть трудно минерализуемых ОВ и снижением концентрации лабильных источников углерода. В структуре сообщества микроорганизмов из проб воды, отобранных в реках Тырма и Сутырь, присутствовали микроорганизмы, обладающие амилазной активностью (способность разлагать полимер крахмал).

Проведенный анализ численности микроорганизмов в главных притоках р. Тырма вполне согласуется с ранее полученными гидрохимическими

Таблица 1. Микробиологическая характеристика водных экстрактов почв на участке с разной глубиной залегания ММП в бассейне р. Тырма

Местоположение и слой (см)	Численность ($N \cdot 10^3$ КОЕ/г) и разнообразие микробных комплексов (Р)					
	КГБ	Р	АМБ	Р	НБ	Р
	Верховье р. Софрон					
0–15	326.7 ± 36.8	3	76.7 ± 13.7	1	363.3 ± 12.5	3
Левый берег р. Софрон (мерзлый горизонт отсутствовал)						
0–15	76.7 ± 8.1	3	3.7 ± 0.6	1	16.7 ± 4.5	1
30–40	126.7 ± 4.5	4	106.7 ± 25.0	3	73.3 ± 2.2	2
70–80	583.3 ± 5.9	6	456.7 ± 13.6	4	290.0 ± 10.3	5
Марь в долине р. Софрон (мерзлый горизонт на глубине 40 см)						
0–10	933.3 ± 16.2	3	206.7 ± 19.2	3	363.3 ± 19.2	3
10–20	790.0 ± 33.9	3	200.0 ± 17.8	1	146.7 ± 13.7	2
30–40	263.3 ± 5.9	4	133.3 ± 14.7	3	120.0 ± 11.6	2
Марь в долине р. Якагулин (мерзлый горизонт на глубине 60 см)						
0–15	1310.0 ± 192.1	4	196.7 ± 19.9	4	1303.3 ± 56.7	2
20–30	703.3 ± 25.9	3	733.3 ± 42.8	2	590.0 ± 84.8	2
50–60	370.0 ± 17.8	3	270.0 ± 17.8	1	226.6 ± 29.4	2

Примечание. Р – разнообразие морфотипов колоний, вырастающих на агаризованных питательных средах.

ми данными по определению содержания ОВ в разные сезоны. Так, максимальное содержание ОВ отмечено в половодье в реках Сутырь и Софрон, дренирующих заболоченные территории [6]. Ранжирование водотоков по снижению общей численности гетеротрофных бактерий можно представить в следующей последовательности (Сутырь > Софрон > Якагулин > Тырма), которая отражает характер поступления РОВ с атмосферными осадками и паводками с территории водосбора. Принимая во внимание, что качество поверхностных вод в значительной степени зависит от особенностей поступления ОВ с водосбора, были проведены исследования спектральных характеристик растворенных ОВ из водных экстрактов почв и потенциальной роли микробных комплексов в биогеохимических процессах на заболоченных участках с многолетней мерзлотой.

Биогеохимические исследования активного слоя

Поступление ОВ из активного слоя почв после обильных дождевых осадков может оказывать большое влияние на динамику биогеохимических процессов в водных экосистемах. Подповерхностные слои почвы (20–40 см) после насыщения водой имеют существенное влияние на обогащение поверхностных вод широким спектром ОВ. Свой вклад в пополнение ОВ вносят такие мерзлые почвы и породы. Важную роль играют разные физиолого-биохимические группы мик-

роорганизмов, участвующие в деструкции ОВ, входящих в состав растительных остатков.

Для сравнения были использованы 10-суточные водные экстракты почв с трех участков с разной глубиной залегания ММП (табл. 1). Как показали исследования, численность различных эколого-физиологических групп микроорганизмов в почвах, отобранных в зоне многолетней мерзлоты в бассейне р. Тырма, изменялась по горизонтам неравномерно.

Максимальная численность КГБ зарегистрирована в поверхностном слое (0–15 см) почвенного разреза, отобранного на мари в долине р. Якагулин ($1310 \cdot 10^3$ КОЕ/г). В водном экстракте этого почвенного субстрата содержалось большое количество полурасщепившихся растительных остатков. С глубиной численность этой группы микроорганизмов снижалась, минимальные значения ($370 \cdot 10^3$ КОЕ/г) регистрировали на глубине 50–60 см, непосредственно над слоем мерзлых пород. В почвенных экстрактах, отобранных на мари в долине р. Софрон, наблюдали аналогичную закономерность распределения численности КГБ, но при других показателях численности.

В почвенном разрезе на левом берегу р. Софрон при отсутствии мерзлого горизонта в разрезе отмечена обратная закономерность распределения численности гетеротрофных бактерий. С увеличением глубины почвенного горизонта происходило увеличение содержания КГБ. Мак-

симальные их значения были зафиксированы в слое 70–80 см, водная вытяжка почвы которого была мутной и содержала большое количество коллоидных фракций и частиц детрита разного размера.

Численность аммонифицирующих бактерий (АМБ), участвующих в деструкции быстро разлагаемых азотсодержащих органических соединений на начальном этапе трансформации ОВ, зависела от глубины залегания ММП и увеличивалась в контактном слое. Максимальная численность АМБ ($733.3 \cdot 10^3$ КОЕ/г) зарегистрирована в экстракте почв, отобранных с глубины 20–30 см на мари в долине р. Якагулин. Эта вытяжка отличалась повышенным содержанием ароматических ОВ и присутствием неразложившейся биомассы мхов *Sphagnum*.

С геоэкологической точки зрения растительность и почвы относятся к числу главных факторов деградации многолетней мерзлоты при потеплении климата. На водосборах с торфяниками важную роль в обогащении природных вод ОВ играют мхи (*Sphagnum spp.*). Их вклад в углеродное обогащение рек и озер сопоставим с макрофитами. Лабильные терригенные ОВ быстро метаболизируются бактериями, в результате чего более стойкие фракции также постепенно растворяются в водной среде [36].

В водных экстрактах почвенных образцов, отобранных на мари в долине р. Софрон, значения численности АМБ были намного ниже в верхних слоях ($\sim 200.0 \cdot 10^3$ КОЕ/г) и постепенно снижались в слое, граничащим с мерзлым слоем. В экстрактах этих почвенных субстратов присутствовали игольчатые частицы детрита и микроорганизмы, образующие колонии черно-фиолетового цвета. Такие культуральные свойства характерны для микроорганизмов, участвующих в разложении растительных остатков. В водных экстрактах почв, отобранных на левом берегу р. Софрон (при отсутствии мерзлоты), закономерность распределения численности аммонификаторов соответствовала распределению КГБ. Их численность увеличивалась с глубиной и достигала максимальных значений в слое 70–80 см (см. табл. 1).

Максимальная численность нитрифицирующих бактерий (НБ), которые окисляют аммонийный азот до нитритов и нитратов, зарегистрирована в экстрактах поверхностного слоя почв, отобранного на мари в долине р. Якагулин ($1303.3 \cdot 10^3$ КОЕ/г). В экстрактах почв, отобранных на мари в долине р. Софрон, численность НБ также снижалась с глубиной почвенного горизонта. В отличие от марей, в водных экстрактах почвенных образцов, отобранных на левом берегу р. Софрон, где отсутствовала мерзлота, численность НБ в верхних слоях была довольно низкой и уве-

личивалась с глубиной незначительно (до $290.0 \cdot 10^3$ КОЕ/г).

Выполненные исследования свидетельствуют о том, что на распределение численности разных физиологических групп микроорганизмов, участвующих в разложении ОВ, влияет не только их генезис, но и присутствие многолетней мерзлоты. На марях с разной глубиной залегания мерзлого слоя численность бактерий, участвующих в цикле углерода и азота, постепенно снижается. Фактически наличие в разрезе слоя ММП оказывало существенное влияние на распределение микроорганизмов по почвенному горизонту, особенно в приконтактной зоне с их кровлей.

Спектральная характеристика водных экстрактов почв активного слоя

Недавние исследования показали, что во всех продуктах выщелачивания ММП, как правило, было больше алифатических соединений и меньше ароматических углеводородов, чем в продуктах, обнаруженных в активном слое [21]. Исследования активного слоя и неглубоких горизонтов ММП, проведенные на трех участках северной части Аляски, показали, что они различались по оптическим свойствам РОВ и способности к бактериальному разложению. Многолетнемерзлые почвы выделяли больше растворенных источников углерода и азота на грамм субстрата, чем выщележащие сезонно мерзлые почвы, в которых ежегодно происходит выщелачивание и разложение ОВ разного строения [37].

Анализ спектральных характеристик ОВ, присутствующих в водном экстракте почв активного слоя и на границе с многолетней мерзлотой в долине р. Тирма показал, что они отличаются в зависимости от места отбора проб. Высокое содержание ОВ, включая ароматические соединения, было обнаружено в экстракте поверхностных слоев (0–15; 20–40 см) почвенного разреза на берегу р. Софрон, где отсутствовал горизонт мерзлых пород. Содержание $ОВ_{254}$ и $ОВ_{275}$ оказалось значительно ниже на заболоченных участках (марях), подстилаемых ММП. Минимальные значения обоих показателей количества ОВ отмечены в экстракте поверхностного 10–20 см слоя на мари в бассейне р. Софрон. Однако содержание экстрагированных $ОВ_{254}$ и $ОВ_{275}$ увеличивалось непосредственно над слоем ММП (рис. 3).

Пространственное распределение ОВ в экстрактах почв, отобранных на марях в бассейне р. Якагулин, было совсем иным. Особенно выделялся слой 20–30 см, в водном экстракте из которого отмечено повышенное содержание ароматических $ОВ_{275}$. В водной суспензии (до фильтрации перед спектрометрией) присутствовала слабо разложившаяся масса мхов. Одна-

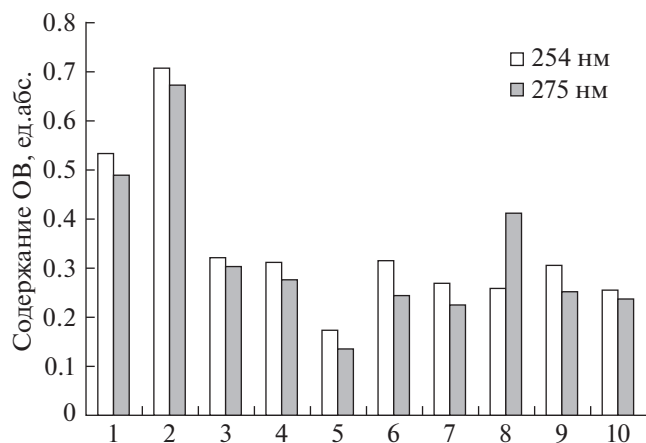


Рис. 3. Общее содержание растворенных веществ (OB_{254}) и ароматических соединений (OB_{275}) в водных вытяжках почвенных субстратов, отобранных в бассейне р. Тымра. Почвенный разрез на левом берегу р. Софрон (100 м от берега), слои: 1 – 0–15 см; 2 – 20–40 см, 3 – 60–80 см; марь в бассейне р. Софрон: 4 – 0–10 см, 5 – 10–20 см, 6 – 20–40 см (ниже горизонт мерзлых пород); марь в бассейне р. Якагулин: 7 – 0–15 см, 8 – 20–30 см, 9 – 50–60 см (ниже горизонт мерзлых пород); 10 – верховье р. Софрон, 0–15 см.

ко содержание ОБ в экстрактах почв, расположенных над мерзлыми горизонтами на марях вблизи обследованных водотоков (Софрон и Якагулин), было сопоставимым. Возможно, что мерзлые породы выступали в роли своеобразного биогеохимического барьера для накопления ОБ.

Микробиологическая трансформация гуминовых веществ in vitro

Гуминовые вещества (ГВ) рассматриваются как неотъемлемый компонент ОБ природных экосистем, который выполняет множество жизненно важных функций. Их вклад в пул ОБ особенно возрастает на заболоченных участках. Макромолекула ГВ состоит из ряда ароматических и алифатических структур с различными функциональными группами [8, 19]. Гетерогенность макромолекулярной структуры ГВ влияет в первую очередь на их физико-химические особенности, приводит к уникальным и разнообразным взаимодействиям с разными соединениями и элементами [24]. Предполагается, что температурный фактор может оказывать существенное влияние на проявление микробной активности по отношению к стойким органическим веществам, включая ГВ.

Для выявления особенностей трансформации ГВ микробными комплексами активного слоя, в качестве инокулята² были использованы водные

экстракты образцов почв, отобранных в бассейне р. Софрон на двух участках (с наличием и без подстилающего горизонта мерзлых пород). Культивирование проводили в течение 30 сут при разной температуре (2, 23°C) с использованием основного источника углерода гумата натрия (ГNa). В качестве контроля использовали минеральную среду с ГNa без инокулята.

Наиболее активными по отношению к ГNa оказались МК из поверхностных слоев (0–15 см, 20–40 см) на левом берегу р. Софрон, которых культивировали при 23°C (рис. 4б). В культуральной жидкости (КЖ) через 30 сут увеличивалось содержание алифатических и ароматических соединений по сравнению с контролем. Активность МК из разных слоев почв, отобранных на мари и в верховье р. Софрон (поверхностный слой), была низкой; спектральные характеристики КЖ фактически не отличались от контроля. При температуре 2°C общая закономерность трансформации ГВ сохранялась (рис. 4а). По-прежнему выделялись МК из поверхностных слоев почв, отобранных вне зоны мерзлоты, однако их активность была значительно ниже, чем при 23°C. Микробные сообщества на марях из разных слоев почв оказались мало активными при пониженной температуре. Было зарегистрировано незначительное снижение содержания OB_{254} и OB_{275} по сравнению с контролем, возможно за счет изменения конфигурации молекул ГВ при отщеплении отдельных функциональных групп.

Особенности распределения литогенных элементов

По данным предшествующих исследований, проведенных в бассейне р. Тымра [33], содержание растворенного железа в воде ее притоков, изменялось в широких пределах. Наименьшими значениями характеризуются воды р. Якагулин, дренирующей преимущественно лесные массивы, а наибольшими значениями – воды рек с заболоченных территорий (Тымра и Сутырь). В результате проведенных сезонных исследований было показано, что содержание $Fe_{раств}$ в р. Софрон было связано с органическими веществами, поступающими из почв вместе с поровыми водами. Авторы связывают это с таянием снега и присутствием мерзлых пород на небольших глубинах.

Согласно нашим экспериментальным микробиологическим исследованиям, содержание ОБ в почвах и их лабильность также зависели от глубины залегания мерзлого слоя. Это существенным образом влияло на структуру микробных комплексов, участвующих в трансформации ОБ и их активность. В конечном счете это находило свое отражение в динамике биогеохимических процессов и специфике поведения многих литоген-

² Инокулят – суспензия живых клеток, вводимая в питательную среду с целью получения новой культуры микроорганизма и для оценки активности микробных комплексов.

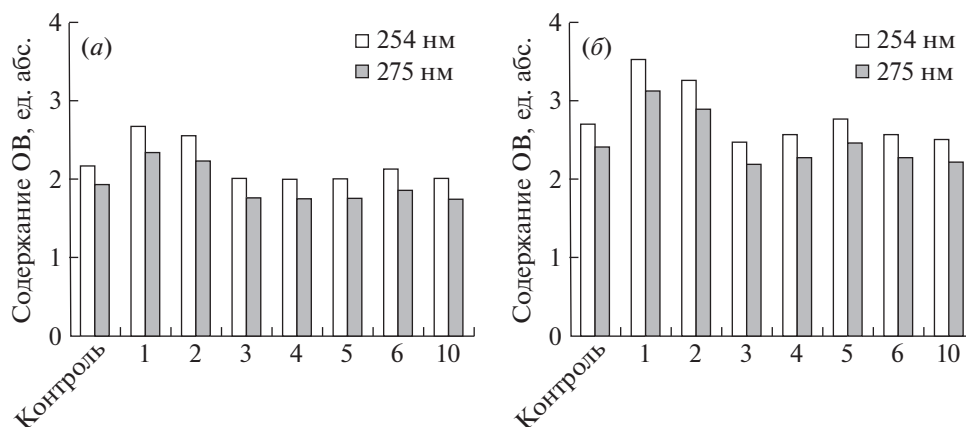


Рис. 4. Особенности трансформации ГВ микробными комплексами из водных вытяжек почвенных субстратов, отобранных в бассейне р. Софрон при 2°C (а) и 23°C (б). Почвенный разрез на левом берегу р. Софрон (100 м от берега), слои: 1 – 0–15 см; 2 – 20–40 см, 3 – 60–80 см; марь в бассейне р. Софрон: 4 – 0–10 см, 5 – 10–20 см, 6 – 20–40 см (ниже горизонт мерзлых пород); 10 – верховые р. Софрон, 0–15 см.

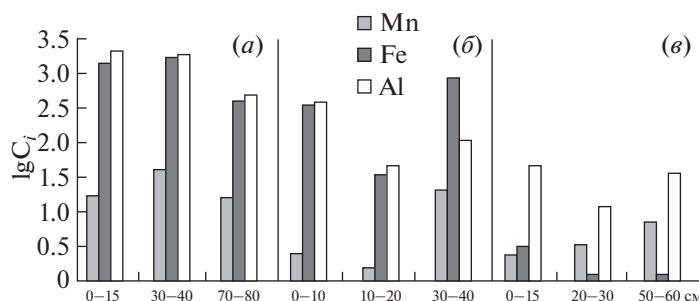


Рис. 5. Распределение литогенных элементов (Fe, Mn, Al) в водных экстрактах почв разных горизонтов в районах, не затронутых мерзлотой (а – левый берег р. Софрон), и на марях (б – долина р. Софрон; в – долина р. Якагулин).

ных элементов, включая железо, марганец и алюминий.

Ранее, в результате сезонных исследований водотоков долины р. Тирма, было установлено, что при минимальном уровне воды в конце июня в воде р. Софрон регистрировали низкие значения $Fe_{раств}$ и РОВ. Однако во время июльских паводков отмечали только рост концентрации РОВ, а содержание железа увеличивалось незначительно. С начала июля до конца августа на фоне снижения уровня воды отмечали постепенное уменьшение $Fe_{раств}$ и РОВ [33].

Как показали наши исследования, общее содержание ионов Fe (растворенных и коллоидных) в экстрактах почв существенно изменялось в зависимости от места отбора образцов и наличия слоя ММП. Повышенные концентрации основных литогенных элементов (Fe, Mn, Al) были установлены в пробах почв, отобранных на левом берегу р. Софрон вне зоны влияния мерзлоты (рис. 5). Максимальное их содержание в верхних слоях почвы может быть связано с повышенным содержанием подвижных органоминеральных

комплексов. При сравнении содержания литогенных металлов на марях установлено, что они неравномерно распределяются по горизонтам на разных участках. Например, на марях в бассейне р. Софрон (рис. 5б) в водном экстракте образца, контактирующего с мерзлым слоем, отмечено увеличение концентрации Fe и Mn.

Иная картина распределения литогенных элементов установлена для образцов, отобранных на марях бассейна р. Якагулин. Концентрация Mn увеличивалась в экстрактах почв, контактирующих с ММП, а содержание Fe снижалось до минимальных значений. Возможно, соотношение между содержанием марганца и железа связано с активностью бактерий, которые в своем метаболизме отдают предпочтение в первую очередь Mn(IV), а восстановление Fe(III) не начинается, пока не будет полностью истощен запас Mn(IV) [29].

Считают, что присутствие ГВ в почвенном растворе приводит к образованию растворимых соединений Al с органическими лигандами [12]. В соответствии с этой гипотезой наибольшие концентрации Al наблюдали в пробах экстрактов

почв, отобранных на левом берегу р. Софрон вне зоны влияния мерзлоты, а на марях — в верхних слоях почвенного фильтрата. Незначительное увеличение содержания алюминия в контактной зоне с мерзлыми породами может быть связано с поступлением ОВ во время их оттаивания и образованием лабильных форм этого элемента.

Полученные результаты по содержанию основных литогенных элементов отражают особенности распределения ОВ в активном слое и на границе с ММП, а также коррелируют с активностью МК по отношению к гуминовым веществам (см. рис. 4). Биогеохимические процессы, происходящие в активном слое, отражаются на дальнейшем поведении ОВ и литогенных элементов при поступлении в малые водотоки, которые формируются в зоне таяния многолетней мерзлоты. Поэтому сток с заболоченных участков в более крупные реки может изменять их трофический статус.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные публикации о последствиях изменения климата связывают с таянием многолетней мерзлоты и эмиссией парниковых газов в атмосферу. Однако менее изучены вопросы, касающиеся поступления в водные экосистемы аккумулярованного в мерзлых породах ОВ, механизмов его трансформации и влияния на качество природных вод. Значительные запасы ОВ, освобождаясь при таянии мерзлых пород, вовлекаются в разнообразные биогеохимические процессы в активном (сезонно мерзлом) слое почв и поступают в водные экосистемы, изменяя их качественный состав.

Ответные реакции экосистем могут иметь региональные особенности, обусловленные литологией ММП и активного слоя, растительным покровом, количеством атмосферных осадков и активностью микроорганизмов-деструкторов. На примере разных регионов было показано, что не только температура является главенствующим фактором, контролирующим скорость деградации мерзлоты и динамику поступления ОВ. Многие зависят от механизмов трансформации ОВ, их стойкости к ферментативному разложению микробными сообществами и активности микроорганизмов-деструкторов.

Лабораторные исследования водных экстрактов из разных слоев почв, отобранных на специфических ландшафтах — марях, свидетельствуют о существенном изменении численности и структуры микробных комплексов в слое, непосредственно контактирующим с ММП. Различия в динамике вымывания ОВ из активного слоя зависят от локализации и глубины залегания слоя ММП. Были установлены значимые различия в

спектральных характеристиках водных экстрактов почв из активного слоя в зависимости от места отбора, состава (почвенные коллоиды, растительный детрит, мхи, частицы глины) и глубины залегания ММП под марями в долинах разных притоков.

Микробные комплексы из активного слоя проявляют *in vitro* разную активность по отношению к гуминовым веществам в зависимости от температуры. В водных экстрактах из разных слоев почв изменяется общее содержание растворенных ОВ и доля фракции ароматических соединений в зависимости от глубины залегания ММП.

Вынос ОВ и их ароматической составляющей из активного слоя в водотоки определяется составом и локализацией отобранных образцов, составом почв активного слоя, глубиной залегания ММП и присутствием таких макроэлементов как Fe, Mn и Al.

При изменении климата мобилизованное в мерзлых породах ОВ поступает не только в атмосферу в виде парниковых газов, но и в водные экосистемы, оказывая влияние на состав воды и их трофический статус.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мордовин А.М., Шестеркин В.П., Антонов А.Л. Река Буря: гидрология, гидрохимия, ихтиофауна. Хабаровск: ДВО РАН, 2006. 149 с.
2. Мурашова Е.Г. Заболочивание в Приамурье // Строительство и природообустройство. Сб. научных трудов. Отв. ред. М.В. Маканикова. Благовещенск: Изд-во: ДВ ГАУ, 2016. С. 72–75.
3. Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д., Хасинов В.В. Полевой практикум по водной микробиологии и гидрохимии. Методическое пособие. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2006. 68 с.
4. Намсараев Б.Б., Хахинов В.В., Турунхаев А.В. Болотные экосистемы перешейка полуострова Святой Нос // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 66–71.
5. Новороцкий П.В. Многолетнее изменение температуры воздуха в бассейне реки Буря // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 118–124.
6. Шестеркин В.П. Гидрохимия реки Тымра // Региональные проблемы. 2021. Т. 24. № 2–3. С. 47–51.
7. Шестеркина Н.М., Таловская В.С., Ри Т.Д., Шестеркин В.П. Гидрохимия притоков Бурейского водохранилища // Пресноводные экосистемы бассейна реки Амур. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 18–27.
8. Ширишова Л.Т., Гиличинский Д.А., Остроумова Н.В., Ермолаев А.М. Применение спектрофотометрии для определения содержания гуминовых веществ в многолетнемерзлых отложениях // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 4. С. 107–113.
9. Bagard M.L., Chabaux F., Pokrovsky O.S., Viers, J., et al. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. № 75. P. 3335–3357.

10. *Balcarczyk K.L., Jones J.B., Jaffe R., Maie N.* Stream dissolved organic matter bioavailability and composition in watersheds underlain with discontinuous permafrost // *Biogeochemistry*. 2009. N 94. P. 255–270.
11. *Deng J., Gu Y., Zhang J., Xue K., et al.* Shifts of tundra bacterial and archaeal communities along a permafrost thaw gradient in Alaska // *Molecular Ecology*. 2015. V. 1. N 24 (1). P. 222–234.
12. *Exley C.A.* Biogeochemical cycle for aluminium? // *J. of Inorganic Biochemistry*. 2003. V. 397. P. 1–7.
13. *Frey K.E., McClelland J.W.* Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // *Hydrol. Process*. 2009. V. 23. P. 169–182.
14. *Hansen A.A., Herbert R.A., Mikkelsen K., Jensen L.L., et al.* Viability, diversity and composition of the bacterial community in a high Arctic permafrost soil from Spitsbergen, Northern Norway // *Environmental microbiology*. 2007. V. 9 (11). P. 2870–2884.
15. *Hebsgaard M.B., Phillips M.J., Willerslev E.* Geologically ancient DNA: fact or artefact? // *Trends Microbiol.* 2005. V. 13. P. 212–220.
16. *Herndon, E.M., Yang, Z., Bargar, J., Janot, N., et al.* Geochemical drivers of organic matter decomposition in arctic tundra soils // *Biogeochemistry*. 2015. № 126. P. 397–414.
17. *Kumar S.* Organic chemistry. Spectroscopy of Organic Compounds. Department of Chemistry, Guru Nanak Dev University, 2006. P. 1–36.
18. *Laglera L.M., Vandenberg C.M.G.* Evidence for geochemical control of iron by humic substances in seawater // *Limnol. Oceanogr.* 2009. № 54. P. 610–619.
19. *Lee B.M., Seo Y.S., Hur J.* Investigation of adsorptive fractionation of humic acid on graphene oxide using fluorescence EEM-PARAFAC // *Water research*. 2015. V. 73. P. 242–251.
20. *Lipson, D.A., Zona, D., Raab, T.K., Bozzolo, F., et al.* Water-table height and microtopography control biogeochemical cycling in an Arctic coastal tundra ecosystem // *Biogeosciences*. 2012. № 9. P. 577–591.
21. *MacDonald E.N., Tank S.E., Kokelj S.V., Froese D.G., Hutchins R.H.S.* Permafrost-derived dissolved organic matter composition varies across permafrost end-members in the western Canadian Arctic // *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16. № 2. e024036. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd971>
22. *Nishioka, J., Nakatsuka, T., Ono, K., Volkov, Y.N., et al.* Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk // *Prog. Oceanogr.* 2014. № 126. P. 180–193. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.011>
23. *Olefelt D., Persson A., Turetsky M.R.* Influence of the permafrost boundary on dissolved organic matter characteristics in rivers within the Boreal and Taiga Plains of western Canada // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9 (035005). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035005>
24. *Perminova I.V.* From green chemistry and nature-like technologies towards ecoadaptive chemistry and technology // *Pure and Applied Chemistry*. 2019. V. 91. № 5. P. 851–864. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-1110>
25. *Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., et al.* Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient // *Biogeosciences*. 2016. V. 13. Is. 6. P. 1877–1900. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1877-2016>
26. *Quinton W.L., Hayashi M., Chasmer L.E.* Peatland hydrology of discontinuous permafrost in the Northwest Territories: overview and synthesis // *Can. Water Resour. J.* 2009. V. 34. P. 311–328. <https://doi.org/10.4296/cwrj3404311>
27. *Rivkina E., Laurinavichius K., McGrath J., Tiedje J., et al.* Microbial life in permafrost // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. P. 1215–1221.
28. *Roehm C.L., Giesler R., Karlsson J.* Bioavailability of terrestrial organic carbon to lake bacteria: the case of a degrading permafrost mire complex // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. G03006 <https://doi.org/10.1029/2008JG000863>
29. *Schlesinger W.* Biogeochemistry. An Analysis of Global Change. 3rd Edition. Academic Press 2013. 688 p.
30. *Schumann R., Schiewer U., Karsten U., Rieling T.* Viability of bacteria from different aquatic habitats. II. Cellular fluorescent markers for membrane integrity and metabolic activity // *Aquatic Microbial Ecology*. 2003. V. 32. P. 137–150 <https://doi.org/10.3354/ame032137>
31. *Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schadel C., Grosse G., et al.* Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. V. 520 (7546). P. 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
32. *Steven B., Briggs G., McKay C.P., Pollard W.H., et al.* Characterization of the Microbial diversity in a permafrost sample from the Canadian high Arctic using culture-dependent and culture-independent methods // *FEMS Microbiol. Ecology* 2007. V. 59. P. 513–523. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00247.x>
33. *Tashiro Y., Yoh M., Shiraiwa T., Onishi T., et al.* Seasonal Variations of Dissolved Iron Concentration in Active Layer and Rivers in Permafrost Areas, Russian Far East // *Water*. 2020. № 12 (2579). <https://doi.org/10.3390/w12092579>
34. *Tjaily M.M., Hamdan R., Corbett J.E., Chanton J.P., et al.* Investigating dissolved organic matter decomposition in northern peatlands using complimentary analytical techniques // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2013. V. 112. P. 116–29. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.03.002>
35. *Vishnivetskaya T., Petrova M.A., Urbance J., Ponder M., et al.* Bacterial community in ancient Siberian permafrost as characterized by culture and culture-independent methods // *Astrobiology*. 2006. V. 6. P. 400–414. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.6.400>
36. *Wauthy M., Rautio M., Christoffersen K.S., Forsström L., et al.* Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw // *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2018. V. 3. Is. 3. P. 186–198. <https://doi.org/10.1002/lol2.10063>
37. *Wickland K.P., Waldrop M.P., Aiken G.R., Koch J.C., et al.* Dissolved organic carbon and nitrogen release from boreal Holocene permafrost and seasonally frozen soils of Alaska // *Environ. Res. Lett.* 2018. V. 13. e065011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac4ad>

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF WATER COMPOSITION IN WATERCOURSES OF BUREYA RIVER BASIN IN THE PERMAFROST ZONE

L. M. Kondratyeva^a, Z. N. Litvinenko^{a, #}, D. V. Andreeva^a, and E. M. Golubeva^b

^a Institute of Water and Ecology Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Dikopol'tseva, 56, Khabarovsk, 680000 Russia

^b Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Dikopol'tseva, 56, Khabarovsk, 680000 Russia

[#]E-mail: zoyana2003@mail.ru

Water composition in different tributaries of the Bureya River (Far East) under the influence of geoeological processes of organic carbon transformation were studied in the active layer of biosphere in the permafrost zone. In the permafrost zone, carbon reserves are concentrated, and upon climate change it can be mobilized and converted into greenhouse gases. Microbial processes are an important mechanism of its transformation. The purpose of the study was to assess comprehensively the composition of surface water in the tributaries of the Bureya River in swampy areas (marshes) depending on the permafrost depth with use a spectrophotometric method for determining the composition of dissolved organic matter (DOM) and experiments on the activity of microbial complexes in the active layer in relation to humic substances. The microbial complexes of the active layer and the depth of the permafrost horizon played a decisive role in DOM composition. It has been experimentally shown that at the same temperature the qualitative composition of DOM in watercourses during the thawing of permafrost can differ significantly.

Keywords: water composition, permafrost, active layer, microbial complexes, humic substances

REFERENCES

- Mordovin, A.M., Shesterkin, V.P., Antonov, A.L. *Reka Bureya: gidrologiya, gidrokhimiya, ikhtiofauna* [The Bureya River: hydrology, hydrochemistry, and ichthyofauna]. Khabarovsk, DVO RAN, 2006, 149 p. (in Russian)
- Murashova, E.G. *Zabolachivanie v Priamur'e* [Bogging in Amur region]. Stroitel'stvo i prirodoobustroistvo [Construction and nature management]. Blagoveshchensk, DV GAU Publ., 2016, pp. 72–75. (in Russian)
- Namsaraev, B.B., Barkhutova, D.D., Khasinov, V.V. *Polevoi praktikum po vodnoi mikrobiologii i gidrokhimii* [Field training guide in water microbiology and hydrochemistry]. Ulan-Ude, BGU Publ., 2006, 68 p. (in Russian)
- Namsaraev, B.B., Khakhinov, V.V., Turunkhaev, A.V. *Bolotnye ekosistemy peresheika poluostrova Svyatoi Nos* [Bog ecosystems of the Svyatoi Nos Peninsula Isthmus]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2009, no. 4, pp. 66–71. (in Russian)
- Novorotskii, P.V. *Mnogoletnee izmenenie temperatury vozdukh v basseine reki Bureya* [Perennial variation in the air temperature in the Bureya River basin]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2013, no. 2, pp. 118–124. (in Russian)
- Shesterkin, V.P. *Gidrokhimiya reki Tyrma* [The Tyrma River hydrochemistry]. *Regional'nye problemy*, 2021, vol. 24, nos. 2–3, pp. 47–51. (in Russian)
- Shesterkina, N.M., Talovskaya, V.S., Ri, T.D., Shesterkin, V.P. *Gidrokhimiya pritokov Bureiskogo vodokhranilishcha* [Hydrochemistry of Bureya water reserve tributaries]. *Presnovodnye ekosistemy basseina reki Amur* [Fresh water ecosystems of the Amur River basin]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2008, pp. 18–27. (in Russian)
- Shirshova, L.T., Gilichinskii, D.A., Ostroumova, N.V., Ermolaev, A.M. *Primenenie spektrofotometrii dlya opredeleniya sodержaniya guminovykh veshchestv v mnogoletnemerzlykh otlozheniyakh* [Application of spectrophotometry for the determination of humic substances in permafrost deposits]. *Kriosfera Zemli*, 2015, vol. XIX, no. 4, pp. 107–113. (in Russian)
- Bagard, M.L., Chabaux, F., Pokrovsky, O.S., Viers, J., Prokushkin, A.S., Stille, P., Rihs, S., Schmitt, A., Dupré, B. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, no. 75, pp. 3335–3357.
- Balcarczyk, K.L., Jones, J.B., Jaffe, R., Maie, N. Stream dissolved organic matter bioavailability and composition in watersheds underlain with discontinuous permafrost. *Biogeochemistry*, 2009, no. 94, pp. 255–270.
- Deng, J., Gu, Y., Zhang, J., Xue, K., Qin, Y., et al. Shifts of tundra bacterial and archaeal communities along a permafrost thaw gradient in Alaska. *Molecular Ecology*, 2015, vol. 1, no. 24 (1), pp. 222–234.
- Exley, C.A. Biogeochemical cycle for aluminium? *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2003, vol. 397, pp. 1–7.
- Frey, K.E., McClelland, J.W. Impacts of permafrost degradation on Arctic river biogeochemistry. *Hydrol. Process*, 2009, vol. 23, pp. 169–182.
- Hansen, A.A., Herbert, R.A., Mikkelsen, K., Jensen, L.L., Kristoffersen, T., et al. Viability, diversity and composition of the bacterial community in a high Arctic permafrost soil from Spitsbergen, Northern

- Norway. *Environmental microbiology*, 2007, vol. 9 (11), pp. 2870–2884.
15. Hebsgaard, M.B., Phillips, M.J., Willerslev, E. Geologically ancient DNA: fact or artefact? *Trends Microbiol.*, 2005, vol. 13, pp. 212–220.
 16. Herndon, E.M., Yang, Z., Bargar, J., Janot, N., Regier, T.Z., et al. Geochemical drivers of organic matter decomposition in Arctic tundra soils. *Biogeochemistry*, 2015, no. 126, pp. 397–414.
 17. Kumar, S. Organic chemistry. Spectroscopy of Organic Compounds. Department of Chemistry, Guru Nanak Dev University, 2006, pp. 1–36.
 18. Laglera, L.M., Vandenberg C.M.G. Evidence for geochemical control of iron by humic substances in seawater. *Limnol. Oceanogr.*, 2009, vol. 54, pp. 610–619. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.2.0610>
 19. Lee, B.M., Seo, Y.S., Hur, J. Investigation of adsorptive fractionation of humic acid on graphene oxide using fluorescence EEM-PARAFAC. *Water research*, 2015, vol. 73, pp. 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.01.020>
 20. Lipson, D.A., Zona, D., Raab, T.K., Bozzolo, F., Mauritz, M., Oechel, W.C. Water-table height and microtopography control biogeochemical cycling in an Arctic coastal tundra ecosystem. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, pp. 577–591. <https://doi.org/10.5194/bg-9-577-2012>
 21. MacDonald, E.N., Tank, S.E., Kokelj, S.V., Froese, D.G., Hutchins, R.H.S. Permafrost-derived dissolved organic matter composition varies across permafrost end-members in the western Canadian Arctic. *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16, no. 2, e024036. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd971>
 22. Nishioka, J., Nakatsuka T., Ono K., Volkov Y.N., Scherbinin A., Shiraiwa, T. Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, 2014, vol. 126, pp. 180–193. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2014.04.011>
 23. Olefeldt, D., Persson, A., Turetsky, M.R. Influence of the permafrost boundary on dissolved organic matter characteristics in rivers within the Boreal and Taiga Plains of western Canada. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9, no. 3, 035005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035005>
 24. Perminova, I.V. From green chemistry and nature-like technologies towards ecoadaptive chemistry and technology. *Pure and Applied Chemistry*, 2019, vol. 91, no. 5, pp. 851–864. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-1110>
 25. Pokrovsky, O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Krickov I.A., Kopysov S.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., and Kirpotin S.N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, pp. 1877–1900. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1877-2016>
 26. Quinton, W.L., Hayashi, M., Chasmer, L.E. Peatland hydrology of discontinuous permafrost in the Northwest Territories: overview and synthesis. *Can. Water Resour. J.*, 2009, vol. 34, pp. 311–328. <https://doi.org/10.4296/cwrj3404311>
 27. Rivkina, E., Laurinavichius K., McGrath J., Tiedje J., Shcherbakova, V., Gilichinsky, D. Microbial life in permafrost. *Adv. Space Res.*, 2004, vol. 33, pp. 1215–1221. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.06.024>
 28. Roehm, C.L., Giesler R., Karlsson J. Bioavailability of terrestrial organic carbon to lake bacteria: the case of a degrading permafrost mire complex. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, G03006. <https://doi.org/10.1029/2008JG000863>
 29. Schlesinger, W.H., Bernhardt E. Biogeochemistry. An analysis of global change. Academic Press. 3rd Edition, 2013, p. 688.
 30. Schumann, R., Schiewer U., Karsten U., Rieling T. Viability of bacteria from different aquatic habitats. II. Cellular fluorescent markers for membrane integrity and metabolic activity. *Aquat. Microb. Ecol.*, 2003, vol. 32, pp. 137–150. <https://doi.org/10.3354/ame032137>
 31. Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, vol. 520, pp. 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
 32. Steven, B., Briggs, G., McKay, C.P., Pollard, W.H., Greer, C.W., Whyte, L.G. Characterization of the Microbial diversity in a permafrost sample from the Canadian high Arctic using culture-dependent and culture-independent methods. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 2007, vol. 59, pp. 513–523. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00247.x>
 33. Tashiro, Y., Yoh M., Shiraiwa T., Onishi T., Shesterkin V., Kim V. Seasonal Variations of Dissolved Iron Concentration in Active Layer and Rivers in Permafrost Areas, Russian Far East. *Water*, 2020, vol. 12, 2579. <https://doi.org/10.3390/w12092579>
 34. Tfaily, M.M., Hamdan, R., Corbett, J.E., Chanton, J.P., Glaser, P.H., Cooper, W.T. Investigating dissolved organic matter decomposition in northern peatlands using complimentary analytical techniques. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2013, vol. 112, pp. 116–29. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.03.002>
 35. Vishnivetskaya, T., Petrova, M.A., Urbance, J., Ponder, M., et al. Bacterial community in ancient Siberian permafrost as characterized by culture and culture-independent methods. *Astrobiology*, 2006, vol. 6, pp. 400–414. <https://doi.org/10.1089/ast.2006.6.400>
 36. Wauthy, M., Rautio, M., Christoffersen, K.S., Forsström, L., Laurion, I., et al. Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw. *Limnol. Oceanogr. Lett.*, 2018, vol. 3, no. 3, pp. 186–198. <https://doi.org/10.1002/lo2.10063>
 37. Wickland, K.P., Waldrop, M.P., Aiken, G.R., Koch, J.C., Jorgenson, M.T., Striegl, R.G. Dissolved organic carbon and nitrogen release from boreal Holocene permafrost and seasonally frozen soils of Alaska. *Environ. Res. Lett.*, 2018, vol. 13, e065011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac4ad>