

Особенности трансформации органических веществ в активном слое многолетней мерзлоты в бассейне реки Буря

Л. М. КОНДРАТЬЕВА¹, Д. В. АНДРЕЕВА¹, З. Н. ЛИТВИНЕНКО¹, В. П. ШЕСТЕРКИН¹, Е. М. ГОЛУБЕВА²

¹ФГБУН «Хабаровский федеральный исследовательский центр
«Институт водных и экологических проблем ДВО РАН»
680000, Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56
E-mail: freckles2008@yandex.ru

²Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН
680000, Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, 65

Статья поступила 10.11.2022

После доработки 21.12.2022

Принята к печати 23.12.2022

АННОТАЦИЯ

В связи с изменением климата особое внимание уделяется факторам, определяющим динамику биогеохимических процессов в активном слое сезоннооттаивающих/замерзающих почв на границе с многолетней мерзлотой. 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. Буря с прерывистым распространением многолетней мерзлоты в пределах уникальных ландшафтных единиц – марей. Они формируются на заболоченных, плохо дренируемых участках, где активный слой почв контактирует с многолетней мерзлотой и оказывает непосредственное влияние на качество поверхностных вод. Представлены результаты исследования состава воды в притоках разного порядка по гидрохимическим показателям, спектральная характеристика растворимых органических веществ (ОВ) в водных экстрактах почв из разных горизонтов активного слоя, оценка активности микробных комплексов по отношению к гуминовым веществам в зависимости от глубины залегания многолетней мерзлоты. Неоднородность ландшафтов оказывается важным фактором, влияющим на вынос ОВ в водотоки. Определяющую роль в изменении состава растворимых ОВ играли микробные комплексы активного слоя, участвующие в трансформации гуминовых веществ. Экспериментально показано, что температура оказывает влияние на качественный состав продуктов метаболизма гуминовых веществ, включая соотношение между алифатическими, ароматическими фрагментами и хромофорными группами, ответственными за цветность природных вод.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, активный слой, микробные комплексы, органические вещества, трансформация.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с изменением климата обсуждается влияние деградации водосборов с многолетней мерзлотой на

состояние водных экосистем с акцентом на евтрофирование за счет доминирования терригенного органического углерода [Wauthy et al., 2018]. В многолетней мерзлоте арктических

и субарктических регионов сосредоточены огромные запасы углерода, которые в условиях продолжающегося изменения климата могут быть мобилизованы и преобразованы в парниковые газы [Schuur et al., 2015]. Важным механизмом этого преобразования является микробный метаболизм [Rivkina et al., 2004], в результате которого водные экосистемы получают растворенные и нерастворенные формы органического углерода.

Изменение климата порой приводит к полной утрате многолетней мерзлоты на торфяниках [Quinton et al., 2009]. Последние играют ведущую роль в переносе органического углерода из наземных экосистем в поверхностные воды. Считают, что экспорт органических веществ из торфяников определяется количеством осадков и удельным стоком [Hugelius et al., 2020]. Изменение состава растворенных органических веществ (ОВ) в поверхностных водах чаще всего происходит при пересечении реками границы многолетней мерзлоты, при таянии которой в водотоках изменяется вклад гуминовых / фульвокислот и особенности их трансформации [Olefeldt et al., 2014]. Особое внимание уделяется рекам, на водосборах которых происходит сезонное оттаивание многолетней мерзлоты, особенно в активном слое (слой почвы, который оттаивает с весны до осени и замерзает зимой) [Herndon et al., 2015]. Предполагают, что сезонная динамика таяния почв влияет на концентрацию многих химических веществ в реках, долины которых находятся в зонах многолетней мерзлоты [Bagard et al., 2011], включая растворенное железо ($\text{Fe}_{\text{раств}}$) [Patzner et al., 2020].

Существенные изменения качества воды наблюдали в реках Западной Сибири, русла которых расположены в низменностях, богатых торфяниками, на границе многолетней мерзлоты [Pokrovsky et al., 2016; Raudina et al., 2017]. 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 ОВ [Намсараев и др., 2009]. В богатых питательными веществами болотах в прерывистой зоне многолетней мерзлоты в состав ОВ входит меньше ароматических соединений, чем на торфяных плато [Roehm et al., 2009].

Высокая биоразлагаемость ОВ часто связана с присутствием азотсодержащих веществ (включая белки и аминокислоты) [Balcarczyk et al., 2009]. Оценка изменения состава растворенных ОВ становится все более актуальной в связи с ростом протяженности зоны оттаивания, которая по прогнозам будет увеличиваться в будущем с большей скоростью [MacDonald et al., 2021].

Анализ поведения ОВ в многолетнемерзлых почвах показал важную роль органо-минеральных, железоорганических ассоциаций и соединений, связанных с минералами [Prater et al., 2020]. Количественные исследования поведения ОВ в многолетнемерзлых торфяниках [Lim et al., 2022] свидетельствуют о том, что в них происходят процессы адсорбции и десорбции растворенных форм органического углерода. Самые высокие концентрации растворенных ОВ регистрировали в богатых Al и Fe минеральных горизонтах. Глубина активного слоя и локализация многолетней мерзлоты определяют физико-химические свойства почвы, оказывают преимущественное влияние на разнообразие и вертикальное распределение микробных комплексов (МК) [Deng et al., 2015]. В зонах многолетней мерзлоты реакции МК на потепление климата имеют решающее значение для оценки изменения состава речных вод. Микробиологические исследования многолетнемерзлых почв в Арктике и Антарктике показали необходимость определения функционально активных (жизнеспособных) клеток [Schumann et al., 2003; Vishnivetskaya et al., 2006]. Установлено, что при изучении замороженных природных сред ДНК сохраняется в течение длительного времени в мертвых клетках, и они не выполняют никаких функций в микробном сообществе [Hebsgaard et al., 2005]. Этим определяется актуальность исследования структуры МК активного слоя почв в зонах многолетней мерзлоты [Steven et al., 2007]. Первые российско-японские исследования, проведенные в бассейне р. Бурея на водосборе р. Тырма с многолетней мерзлотой показали, что интенсивность оттаивания мерзлых почв оказывает существенное влияние на концентрацию $\text{Fe}_{\text{раств}}$ в реках, а важным контролирующим фактором на водоразделе с многолетней мерзлотой выступают гуминовые вещества [Tashiro et al., 2020].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Основными факторами, определяющими климат в Приамурье и в бассейне р. Бурея, являются географическое положение на восточной окраине обширного Азиатского континента, граничащего с Тихим океаном, сложная орография, муссонный характер циркуляции атмосферы и циклоническая деятельность [Мордовин и др., 2006].

В бассейне Буреи встречаются многолетние мерзлые породы (ММП) и выделяются три геокриологических района. Температура грунтов ММП составляет от $-1,5$ до -2 °С.

Первый район включает в основном северную часть бассейна, характеризуется преимущественно сплошным типом распространения ММП до 90–95 %.

Второй район охватывает центральную часть водосбора Буреи с преобладанием ММП сильно прерывистого (долины и нижние части склонов долин рек) и массивно-островного (25–50 % территории) типов.

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 [Мордовин и др., 2006].

В бассейне Буреи выявлен положительный линейный тренд роста среднегодовой температуры воздуха со скоростью $0,23$ °С за 10 лет [Новороцкий, 2013]. Наибольшее потепление по сезонам года отмечается в зимне-весенний период ($0,30$ – $0,47$ °С/10 лет); оно в 2–3 раза превышает потепление летом и осенью. Пониженные участки в пределах Тырменской и Верхнебуреинской равнин заболочены до 15 % [Мордовин и др., 2006]. Довольно часто встречаются 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-болотистые почвы, где растительность представлена редкостойными лиственничниками, ерниками и болотными мхами [Мурашова, 2016].

Река Тырма – один из крупных притоков Буреи. Площадь водосбора 15100 км², длина 334 км. Основными ее притоками являются реки Юрин (длина 195 км), Гуджал (171 км) и Сутырь (174 км). Наблюдения Росгидромета за химическим составом воды осуществляются только на р. Юрин. Гидрохимическая изученность р. Тырма и ее притоков низкая, первые исследования в ее бассейне были начаты в 2015 г. [Шестеркин, 2021]. По типу макрорельефа выделяются низменные участки в долинах рек Софрон и Якагулин. На заболоченных участках широко распространены мхи *Sphagnum* и рассеяны лиственницы (*Larix gmelinii* var. *gmelinii*) [Shamov et al., 2014].

В октябре 2017 г. проведены комплексные исследования в бассейне р. Тырма, на притоках Сутырь, Софрон и Якагулин (рис. 1) с использованием гидрохимических, спектральных и микробиологических методов. Пробы воды отбирали батометром с поверхностного слоя. Гидрохимические исследования проводили в Центре коллективного пользования при ИВЭП ДВО РАН по стандартным методикам.

Почвенные разрезы были заложены на левом пологом берегу р. Софрон, где мерзлота отсутствовала, а также на марях с разной глубиной залегания многолетней мерзлоты в долинах рек Софрон (на глубине 40 см) и Якагулин (на глубине 60 см). Оттаивание мерзлоты до глубины 10 см на участке, расположенном недалеко от левого берега р. Софрон, завершалось 24 мая, а на глубине 25 см – только 15 июня. Активный слой мощностью 40–60 см в долинах этих рек характеризуется максимальным содержанием торфа – 60–80 % [Tashiro et al., 2020]. Максимальное количество органического углерода зафиксировано в почвенных разрезах, отобранных в долинах рек Софрон и Якагулин (300 – 474 гС/кг) с повышенным содержанием влаги (89–98 %). На пологих склонах наблюдали скопление ОВ на глубине 10–20 см, на вершине холмов регистрировали повышенное содержание ОВ, в верхнем слое и затем с глубиной его содержание снижалось в 3–6 раз.

Для моделирования выноса разных форм ОВ в водотоки из переувлажненных почв во время интенсивных осадков и таянии мерзлоты проведена серия экспериментальных исследований с использованием водных экстрактов (ВЭ) почв, контактирующих с многолетней

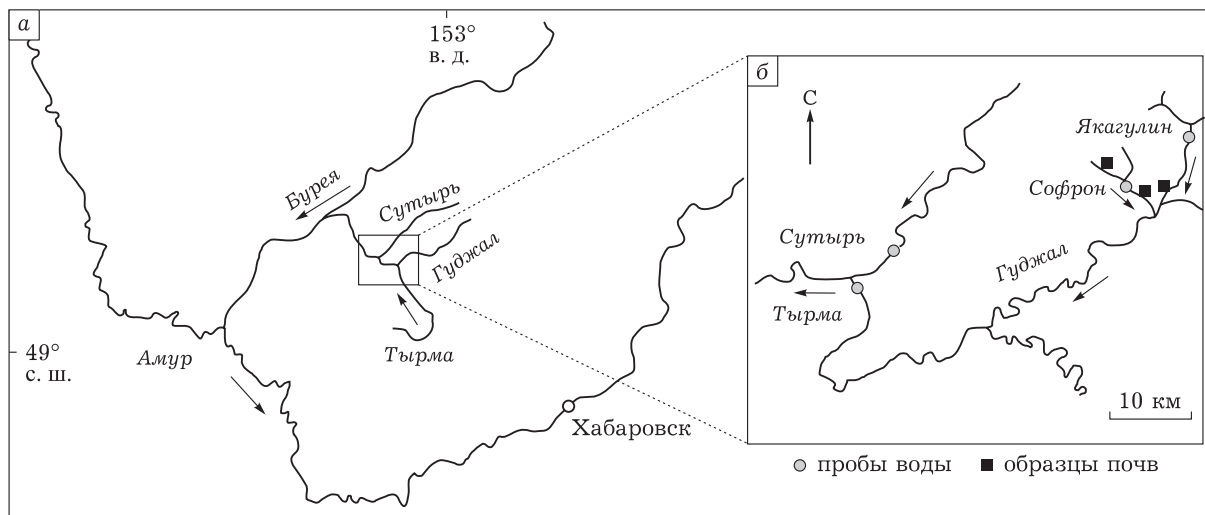


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб воды и почв в бассейне р. Тырма

мерзлотой в долинах рек Софрон и Якагулин. Приготовление ВЭ почв проводили следующим образом: 1 г субстрата вносили в 100 мл стерильной дистиллированной воды, встряхивали автоматически на шейкере (150 об/мин) в течение 20 мин. Затем почвенную суспензию выдерживали в течение 10 суток в холодильнике при 2 °С и использовали для дальнейших спектрофотометрических и микробиологических исследований. Предполагали, что в водной вытяжке присутствовали разные фракции растворенных, коллоидных и взвешенных органо-минеральных форм ОВ, которые могут трансформироваться микробными комплексами *in vitro*.

Спектрофотометрические исследования.

Для характеристики оптических свойств растворенных ОВ использовали спектры поглощения воды в диапазоне 200–800 нм. Спектрофотометрические измерения проводили в 10-миллилитровой кварцевой кювете на двухканальном спектрофотометре Shimadzu UV-3600 (Япония). Суммарное содержание растворенных ОВ (ОВ₂₅₄) определяли при $\lambda = 254$ нм, а ароматических соединений (ОВ₂₇₅) при $\lambda = 275$ нм [Kumar, 2006]. Для оценки качественных изменений в составе ОВ использовали расчетные коэффициенты: A_{465}/A_{665} , косвенно характеризующий степень ароматичности и алифатичности органических веществ [Chen et al., 2002; Tadini et al., 2014], и A_{254}/A_{436} указывающий на преобладание общего содержания ОВ над хромоформными группами, отвечающими за окраску растворов [Ширшова и др., 2015].

Микробиологические исследования. Численность культивируемых гетеротрофных бактерий (КГБ) в пробах воды и почвенных вытяжках определяли методом предельных разведений 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, учитывали на крахмал-аммиачном агаре (КАА). Численность выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ/мл для воды и КОЕ/г для почвы) [Намсараев и др., 2006]. Потенциальную активность МК из разных слоев почв по отношению к гуминовым веществам определяли при разных температурах (2 и 23 °С), используя препарат гумата натрия (ГNa) (фирма Sigma Aldrich, Германия). В качестве инокулята использовали почвенные вытяжки из расчета 1 мл суспензии на 100 мл питательной среды М9 следующего состава (г/л дистиллированной воды): ГNa – 0,2; KH_2PO_4 – 1,33; K_2HPO_4 – 2,67; NH_4Cl – 1; Na_2SO_4 – 2; KNO_3 – 2; $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,001; $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,1. Активность трансформации ГNa определяли спектрофотометрически на 30-е сутки по изменению значений абсорбции культуральной жидкости (КЖ) при разных длинах волн, после ее предварительной фильтрации. В качестве контроля использовали минеральную среду с ГNa без инокулята.

Определение литогенных элементов в водном экстракте почв. Отделение крупнозер-

нистых частиц из ВЭ почв проводили путем фильтрации через бумажный фильтр “синяя лента” (диаметр пор 2–3 мкм). Фильтрат переносили в полипропиленовые пробирки на 50 мл и консервировали свежеприготовленной 1%-й HNO_3 . В фильтрате определяли общее содержание химических элементов без разделения на фракции (растворенные, нерастворенные и коллоидные) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) на приборе Elan 9000 (Perkin Elmer, Канада) в Хабаровском инновационно-аналитическом центре коллективного пользования ИТиГ ДВО РАН по методике ПНД Ф 14.1:2.4.143–98.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гидрохимическая и микробиологическая характеристика р. Тырма и ее притоков. Водотоки бассейна р. Тырма характеризуются гидрокарбонатно-кальциевым составом, невысокой величиной минерализации ($<50 \text{ мг/дм}^3$), слабокислыми значениями pH. Высокое содержание ОВ, отмеченное во время паводков в водотоках бассейна р. Тырма, сопровождалось увеличением цветности до $86\text{--}103 \text{ }^\circ\text{Pt-Co}$ шкалы. Увеличение стока ОВ и цветности происходят одновременно с повышением расходов воды. В маловодные годы цветность воды в р. Тырма может снижаться в 2 раза.

Геологические, гидрологические и геоэкологические условия территории обуславли-

ли основные различия в химическом составе воды в р. Тырма и ее притоках в период исследований (табл. 1).

Биогенную составляющую химического стока р. Тырма и ее притоков оценивали по содержанию аммонийного и нитратного азота. В октябре 2017 г. различия между водотоками по этим показателям фактически отсутствовали. Доля минерального фосфора в стоке биогенных веществ была незначительной и не превышала $0,006 \text{ мг P/л}$.

Содержание растворенного железа ($\text{Fe}_{\text{раств}}$) в воде исследуемых рек изменялось в более широких пределах. На фоне низкой цветности были установлены его минимальные значения в воде р. Якагулин, дренирующей преимущественно лесные массивы. Наибольшие значения растворенного железа были характерны для проб воды, отобранных в реках с заболоченными водосборами (Тырма и Сутырь). Сезонные исследования показали [Tashiro et al., 2020], что $\text{Fe}_{\text{раств}}$ в р. Софрон было связано с ОВ, которые поступали из почв вместе с поровыми водами. Согласно проведенным исследованиям состав воды в р. Тырма и ее притоках отличается по минерализации и содержанию растворенных ОВ. Существенные различия по содержанию ОВ, определяемому по двум гидрохимическим показателям (ПО, ХПК) установлены в р. Якагулин.

Согласно микробиологическим исследованиям в осенний период максимальная численность трех физиологических групп бактерий,

Т а б л и ц а 1
Химический состав воды в р. Тырма и ее притоках (октябрь, 2017 г.)

Показатель	Тырма	Сутырь	Софрон	Якагулин
Цветность, $^\circ\text{Pt-Co}$	103	66	66	54
Na^+ , мг/л	1,2	1,3	1,3	1,1
K^+ , мг/л	0,3	0,3	0,3	0,3
Ca^{2+} , мг/л	7,5	6,7	3,8	4,6
Mg^{2+} , мг/л	2,5	2,5	2,0	1,8
HCO_3^- , мг/л	30	29	18	22
SO_4^{2-} , мг/л	3,2	3,7	2,0	4,5
Cl^- , мг/л	0,8	0,8	0,7	1,0
NH_4^+ , мг N/л	$<0,05$	0,5	$<0,05$	$<0,05$
NO_3^- , мг N/л	0,07	0,07	0,07	0,07
dFe, мг/л	0,19	0,18	0,09	0,05
Минерализация, мг/л	46,1	45,0	28,6	35,7
ПО, мгО/л	16,2	11,3	13,1	9,6
ХПК, мгО/л	33	13	16	24

П р и м е ч а н и е. ПО – перманганатная окисляемость; ХПК – химическое потребление кислорода.

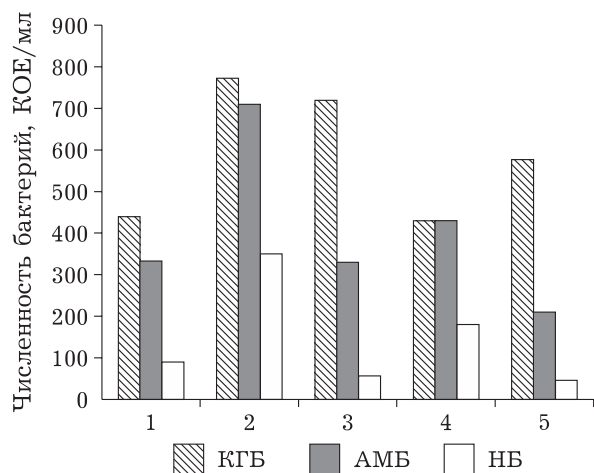


Рис. 2. Изменение численности физиологических групп культивируемых бактерий в р. Тырма и ее основных притоках: 1 – Тырма, 2 – Сутырь, 3 – Софрон, 4 – Якагулин (6.10), 5 – Якагулин (14.10); КГБ – культивируемые гетеротрофные бактерии, АМБ – аммонифицирующие бактерии, НБ – нитрифицирующие бактерии

принимающих участие в трансформации и де-струкции ОВ различного строения, была установлена в р. Сутырь (рис. 2). Другие водо-токи отличались по соотношению физиологи-ческих групп бактерий-деструкторов. Это мо-жет быть связано с разным составом ОВ.

Высокая численность АМБ и НБ в р. Су-тырь может свидетельствовать о присут-ствии азотсодержащих ОВ, которые быстро трансформируются и утилизируются. Их доля в других водотоках была значительно ниже. Максимальная цветность, высокие показатели ХПК и ПО в р. Тырма согласуются с низкой численностью бактерий-деструкторов азот-содержащих ОВ и говорят о доминировании трудноминерализуемых гуминовых веществ. В р. Якагулин пробы воды отбирали дважды при разном водном режиме. Установлено, что раз-личия в структуре МК связаны с поступле-нием в речную сеть после дождей в основном трудно минерализуемых ОВ.

Биогеохимические исследования активно-го слоя. Микроорганизмы в тающей многолет-ней мерзлоте играют ключевую роль в регу-лировании биогеохимических циклов углерода и азота. Для сравнения состава МК и опреде-ления численности различных эколого-физио-логических групп микроорганизмов в почвах активного слоя были использованы их ВЭ с трех участков с разной глубиной залегания мерзлоты. Как показали исследования, струк-тура МК изменялась по горизонтам нерав-номерно (табл. 2). При отсутствии мерзлого слоя численность трех физиологических групп

Т а б л и ц а 2

Микробиологическая характеристика водных экстрактов почв на участке с разной глубиной залегания многолетней мерзлоты в бассейне р. Тырма

Слой, см	Численность ($N \times 10^3$ КОЕ/г) и разнообразие микробных комплексов, R*					
	КГБ	R	АМБ	R	НБ	R
Верховье р. Софрон						
0–15	326,7 ± 36,8	3	76,7 ± 13,7	1	363,3 ± 12,5	3
Левый берег р. Софрон (мерзлота отсутствовала)						
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

*R – разнообразие морфотипов колоний, вырастающих на агаризованных питательных средах.

культивируемых микроорганизмов увеличивалась с глубиной. В присутствии многолетней мерзлоты численность микроорганизмов постепенно снижалась в нижних слоях. Максимальная численность КГБ зарегистрирована в поверхностном слое (0–15 см) почв на мари в долине р. Якагулин. Образец почв содержал большое количество полуразложившихся растительных остатков. Непосредственно перед слоем многолетней мерзлоты численность КГБ снижалась в 4 раза. В почвенных экстрактах, отобранных на мари в долине р. Софрон, наблюдали аналогичную закономерность распределения численности КГБ. В отличие от ВЭ почв, отобранных на марях, в почвенном разрезе на левом берегу р. Софрон с увеличением глубины наблюдали увеличение численности КГБ. Суспензия почв из нижнего слоя была мутной и содержала большое количество коллоидных фракций и частиц детрита разного размера.

Неожиданные результаты получены при определении численности АМБ. Их максимальная численность зарегистрирована в водном экстракте почв, отобранных с глубины 20–30 см на мари в долине р. Якагулин, который отличался присутствием неразложившейся биомассы мхов *Sphagnum*. В экс-

trakтах почв, отобранных на левом берегу р. Софрон (при отсутствии мерзлоты), распределение численности АМБ по горизонтам соответствовало распределению КГБ, их численность достигала максимальных значений в слое 70–80 см (см. табл. 2). В экстрактах почв (темно-бурый цвет, игольчатые частицы детрита), отобранных на мари в долине р. Софрон, численность АМБ была ниже и постепенно снижалась в слое, граничащем с мерзлотой.

Максимальная численность НБ, которые окисляют аммонийный азот до нитритов и нитратов, зарегистрирована в экстрактах почв из поверхностного слоя, отобранного на мари в долине р. Якагулин. На мари в долине р. Софрон, численность НБ в экстрактах почв также снижалась с глубиной почвенного горизонта. В экстрактах почвенных образцов, отобранных на левом берегу р. Софрон, где отсутствовала мерзлота, численность НБ была довольно низкой.

Анализ спектральных характеристик ОВ, присутствующих в ВЭ почв активного слоя в долине р. Тымра, показал, что они отличаются в зависимости от места отбора проб (рис. 3). Высокое содержание ОВ, включая ароматические соединения, обнаружено в ВЭ

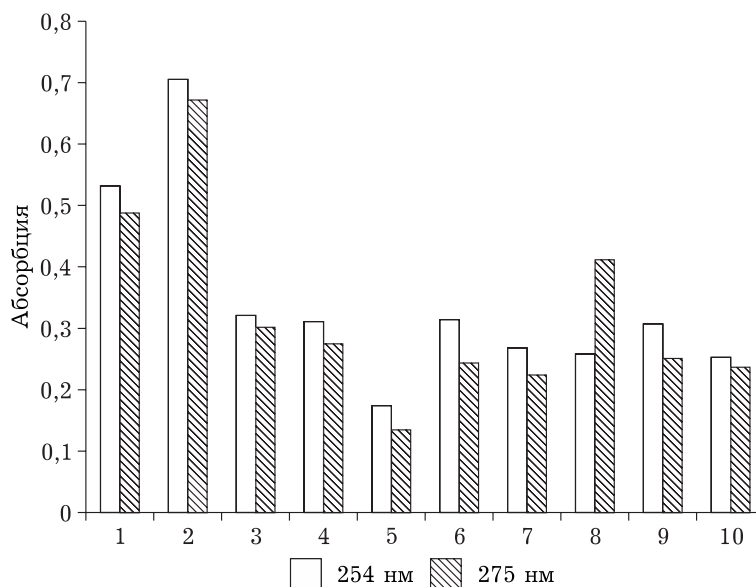


Рис. 3. Абсорбция растворенных органических веществ (254 нм) и ароматических соединений (275 нм) в водных экстрактах почвенных субстратов: почвенный разрез на левом берегу р. Софрон (100 м от берега), слой: 1 – 0–15 см; 2 – 20–40 см, 3 – 60–80 см; мари в бассейне р. Софрон: 4 – 0–10 см, 5 – 10–20 см, 6 – 20–40 см (ниже мерзлота); мари в бассейне р. Якагулин: 7 – 0–15 см, 8 – 20–30 см, 9 – 50–60 см (ниже мерзлота); 10 – 0–15 см верховье р. Софрон

поверхностных слоев (0–15, 20–40 см) почвенного разреза на берегу р. Софрон, где отсутствовала многолетняя мерзлота.

Минимальное количество ОВ отмечено в экстракте почв поверхностного слоя 10–20 см на мари в бассейне р. Софрон. Однако содержание экстрагированных ОВ₂₅₄ и ОВ₂₇₅ вновь увеличивалось непосредственно над слоем мерзлоты. На марях в бассейне р. Якагулин выделялся слой 20–30 см, в ВЭ которого отмечено повышенное содержание ароматических соединений (ОВ₂₇₅). В целом, содержание ОВ в экстрактах почв из слоев, расположенных над мерзлотой вблизи обследованных водотоков (Софрон и Якагулин), было сопоставимым.

Микробиологическая трансформация гуминовых веществ *in vitro*. Для определения особенностей микробной трансформации гуминовых веществ (ГВ) на двух участках, отличающихся присутствием многолетней мерзлоты, в качестве инокулята использовали ВЭ образцов почв, отобранных в бассейне р. Софрон. Культивирование проводили в течение 30 суток при разной температуре (2 °С, 23 °С) с использованием гумата натрия (ГНа). Наиболее активными при 23 °С по отношению к ГНа оказались МК из поверхностных слоев (0–15 см, 20–40 см) на левом берегу р. Софрон. Через 30 суток в культуральной среде увеличивалось содержание алифатических и ароматических компонентов по сравнению с контролем. Активность МК из разных слоев почв, отобранных на мари и в верховье р. Софрон (поверхностный слой), была низкой, спектральные характерис-

тики КЖ фактически не отличались от контроля. При температуре 2 °С выделялись МК из поверхностных слоев почв, отобранных вне зоны мерзлоты, однако их активность была значительно ниже, чем при 23 °С.

Неожиданные результаты получены при использовании расчетных коэффициентов. Согласно коэффициенту A_{465}/A_{665} наиболее активно процессы трансформации молекул ГВ происходили при 2 °С на глубине 60–80 см (левый берег р. Софрон) и в поверхностных слоях на мари в бассейне р. Софрон (табл. 3).

Показатели увеличения гумификации КЖ можно связать с активностью МК и высокой численностью физиологических групп бактерий. На марях в бассейне р. Софрон в слое 20–40 см, контактирующим с мерзлотой, перечисленные изменения были менее выраженными за счет более низкой численности микроорганизмов.

Среди продуктов трансформации ГВ при 23 °С преобладала алифатическая составляющая ОВ, указывающая на разрушение связей между конденсированными ароматическими структурами. Повышение температуры мало повлияло на поведение хромофорных групп при микробиологической трансформации ГВ *in vitro*.

Особенности распределения литогенных элементов. Согласно экспериментальным микробиологическим исследованиям, содержание ОВ в почвах и их лабильность зависели от глубины залегания слоя мерзлоты. Это существенным образом влияло на структуру

Т а б л и ц а 3

Коэффициенты трансформации гуминовых веществ микробными комплексами водных вытяжек почвенных субстратов при разной температуре

№	Место отбора	Горизонт, см	2 °С		23 °С	
			A_{254}/A_{436}	E_{465}/E_{665}	A_{254}/A_{436}	E_{465}/E_{665}
	Контроль		4,85	81,60	4,12	72,57
1	Почвенный разрез на левом берегу р. Софрон (100 м от берега)	0–15	5,70	90,00	4,61	46,20
2		20–40	5,38	113,33	5,18	53,54
3		60–80	5,85	266,00	4,68	83,2
4	Марь в бассейне р. Софрон	0–10	6,04	269,00	4,25	87,6
5		10–20	4,85	265,00	4,35	67,75
6		20–40	4,66	154,00	4,93	91,4
10	Верховье р. Софрон	0–15	6,06	131,00	5,71	97,25

микробных комплексов, динамику биогеохимических процессов и распределение литогенных элементов. Так, повышенные концентрации основных литогенных элементов (Fe, Mn, Al) установлены в водных экстрактах почв, отобранных на левом берегу р. Софрон вне зоны влияния мерзлоты (табл. 4). Это может быть связано с их участием в составе подвижных органоминеральных комплексов. На марях литогенные элементы распределяются по горизонтам на разных участках неравномерно. Например, на марях в бассейне р. Софрон, в водном экстракте образца, контактирующего с мерзлотой, отмечено увеличение концентрации Fe и Mn. Однако на марях в бассейне р. Якагулин концентрация Mn увеличивалась в экстрактах почв, контактирующих с мерзлотой, а содержание Fe снижалось до минимальных значений. Такое поведение марганца и железа может быть связано с активностью МК, которые в своем метаболизме отдают предпочтение в первую очередь Mn (IV), а восстановление Fe (III) не начинается, пока не будет полностью истощен запас марганца [Exley, 2003].

Отсутствие железа в водных экстрактах проб почв, отобранных в активном слое (20–60 см) на марях р. Якагулин, может быть связано с его сорбцией мхами *Sphagnum*, фраг-

менты которого присутствовали в суспензии до фильтрации. Известно, что высокое содержание кислородсодержащих функциональных групп, большая удельная поверхность и высокая пористость позволяют сфагнуму поглощать различные вещества преимущественно катионы металлов посредством ионного обмена, комплексообразования и других реакций [Zhang et al., 2018]. На марях концентрация Al была намного ниже, особенно в экстрактах почв из верхних слоев. Низкие концентрации алюминия в экстрактах почв, отобранных на марях в бассейне р. Якагулин, также могут быть связаны с его сорбцией мхами.

По данным японских исследователей [Tashiro et al., 2020], повышенные концентрации $Fe_{раств}$ в поровых водах в летний период существенно снижались к октябрю. Возможной причиной этого может быть понижение уровня грунтовых вод в активном слое за счет снижения количества осадков в сентябре и изменение окислительно–восстановительных условий. Значительная часть $Fe_{раств}$ в поровых водах окислилась кислородом до нерастворимых оксигидроксидов железа и/или железозакисляющими бактериями.

В период оттаивания марей верхние слои насыщаются водой, которая из-за подстилающей мерзлоты не просачивается в нижние го-

Т а б л и ц а 4

Распределение литогенных элементов (Fe, Mn, Al) в водных экстрактах почв разных горизонтов в районах, не затронутых мерзлотой (левый берег р. Софрон), и на марях в долинах рек Софрон и Якагулин

Слой, см	Элемент, мкг/л		
	Mn	Fe	Al
Левый берег р. Софрон			
0–15	17,56	1434,62	2081,37
20–40	40,66	1783,03	1877,87
60–80	16,52	414,11	492,02
Марь в долине р. Софрон (мерзлый горизонт на глубине 40 см)			
0–10	2,22	143,51	146,74
10–20	1,49	20,73	26,37
20–40	12,96	298,95	51,81
Марь в долине р. Якагулин (мерзлый горизонт на глубине 60 см)			
0–15	2,30	3,07	41,93
20–30	3,31	–	11,00
50–60	6,48	–	32,73

ризонты почвы. Здесь формируются бескислородные условия, при которых трехвалентное железо выступает акцептором электронов при микробном метаболизме. В результате окислительно-восстановительных реакций железо переходит в двухвалентное состояние и образует растворимые комплексные соединения с органическими лигандами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Поступление ОВ из активного слоя почв после обильных осенних осадков может оказывать влияние на динамику биогеохимических процессов в водных экосистемах. Поверхностные слои почвы после насыщения водой выполняют важную функцию в обогащении поверхностных вод широким спектром ОВ с разной степенью устойчивости к разложению. На участках многолетней мерзлоты характер биоразлагаемости ОВ *in situ* в значительной степени зависит от места их локализации. Так, биодоступность ОВ многолетних мерзлых почв составляет 22 %, сухой почвы активного слоя – 32 %, а заболоченных почв – 56 % [Roehm et al., 2009].

На водосборах с торфяниками важную роль в обогащении природных вод растворенными ОВ играют мхи (*Sphagnum* spp.). Их вклад в углеродное пополнение рек и озер сопоставим с макрофитами [Zhang et al., 2018]. Лабильные терригенные ОВ быстро метаболизируются бактериями, в результате чего более стойкие фракции также постепенно растворяются в водной среде [Wauthy et al., 2018].

Недавние исследования показали, что при таянии многолетней мерзлоты, выделяется больше алифатических соединений, чем ароматических углеводородов [MacDonald et al., 2021]. Из многолетнемерзлых почв поступает больше растворенных форм углерода и азота на грамм субстрата, чем из вышележащих сезонно-мерзлых почв [Wickland et al., 2018].

Проведенные нами исследования свидетельствуют о том, что присутствие многолетней мерзлоты оказывало существенное влияние на распределение разных групп ОВ и микроорганизмов по почвенным горизонтам. На марях с разной глубиной залегания мерзлого слоя численность бактерий, участвующих в цикле углерода и азота, постепенно снижалась. При этом разные экологи-

физиологические группы снижали свою численность с глубиной из-за присутствия трудно доступных ОВ, включая ГВ, которые рассматриваются как неотъемлемый компонент природных экосистем.

Вклад ГВ в общий пул органических веществ особенно возрастает на заболоченных участках. Макромолекула ГВ состоит из ряда ароматических и алифатических структур с различными функциональными группами [Ширшова и др., 2015]. Соотношение между ароматической и алифатической частями в макромолекулах ГВ принято характеризовать отношением оптических плотностей полос поглощения при 465 и 665 нм (A_{465}/A_{665}) [Chen et al., 2002]. Низкие значения коэффициента A_{465}/A_{665} указывают на доминирование конденсированных ароматических фрагментов в структуре макромолекул ГВ [Хилько и др., 2020]. Значения абсорбции при $\lambda = 436$ нм связывают с хромофорной составляющей ГВ, ответственной за их окраску. Коэффициент E_{254}/E_{436} указывает на преобладание общего содержания ОВ над хромофорными группами [Ширшова и др., 2015].

Предполагают, что концентрация алифатических растворенных веществ, поступающих в поверхностные воды из мерзлых торфяников, довольно низкая для поддержания микробной активности. При этом влияние температуры (4, 23 и 37 °C) на биоразлагаемость растворенных ОВ, поступающих из замороженных почв оказалось незначительным, в течение 28 суток разлагалось лишь 5–10 % [Shirokova et al., 2019].

Согласно нашим исследованиям наиболее активно процессы трансформации конденсированных ароматических фрагментов в структуре макромолекул ГВ происходили при 2 °C на глубине 60–80 см (левый берег р. Софрон) и в поверхностных слоях на мари в бассейне р. Софрон. Принимая во внимание, что к числу хромофорных функциональных групп относятся азогруппа ($-N=N-$), азометиновая ($>C=N-$), карбоиминовая ($>C=NH$), нитрогруппа ($-NO_2$) и нитрозогруппа ($-N=O$) [Schlesinger, 2013], можно предположить, что их утилизация происходила в первую очередь за счет функционирования бактерий-деструкторов, участвующих в цикле азота.

Гетерогенность макромолекулярной структуры ГВ влияет в первую очередь на их

физико-химические свойства [Perminova, 2019]. Неоднородность функциональных групп ГВ зависит от активности МК, которые могут оказывать влияние на реакции комплексообразования и/или восстановления, а также на биодоступность многих элементов [Tadini et al., 2014].

Считают, что присутствие ГВ в почвенном растворе приводит к образованию растворимых соединений Al с органическими лигандами [Fukumasu et al., 2021]. Согласно проведенным исследованиям [Schlesinger, 2013], Al-несущие минеральные фазы в верхних горизонтах почв выполняют важную функцию в стабилизации растворенных ОБ по сравнению с железом, особенно при влажном континентальном климате. В соответствии с этой гипотезой наибольшие концентрации Al наблюдали в пробах ВЭ почв, отобранных на левом берегу р. Софрон вне зоны влияния мерзлоты. Коррелирующее изменение концентраций железа и алюминия соответствует тесной взаимосвязи с составом ОБ и не противоречит новым данным, полученным другими авторами. Например, установлено, что на поведение растворенных ОБ в минеральном слое почвы влияет ряд факторов: адсорбция растворенных ОБ полуторными окислами железа и алюминия; совместное осаждение ОБ с окси(гидр)оксидами алюминия и железа; удержание растворенных ОБ на других минеральных фазах (например, глинистых минералах, оксидах Mn) [Patzner et al., 2020; Lim et al., 2022].

На примере рек Западной Сибири показано, что миграция элементов определяется преобладанием торфяных почв, поставляющих высокие концентрации растворенных ОБ аллохтонного характера [Pokrovsky et al., 2016]. Кроме того, в присутствии растворенных ОБ многие обычно нерастворимые малоподвижные элементы, особенно трехвалентные и четырехвалентные гидролизаты, а также некоторые двухвалентные металлы, становятся более лабильными [Stolpe et al., 2013].

В наших исследованиях максимальное содержание железа и марганца зафиксировано в водных экстрактах поверхностных слоев (20–40 см) почвенного разреза на берегу р. Софрон вне зоны многолетней мерзлоты. Такое поведение элементов коррелирует с максимальными концентрациями ОБ, которые

были здесь установлены. Аналогичная зависимость распределения элементов и ОБ показана для почвенного разреза, расположенного на мари р. Софрон.

Полученные результаты по содержанию основных литогенных элементов в водных экстрактах почв отражают особенности распределения ОБ в активном слое на границе с многолетней мерзлотой, а также коррелируют с активностью МК по отношению к гуминовым веществам. Биогеохимические процессы, происходящие в активном слое, отражаются на дальнейшем поведении ОБ и литогенных элементов при поступлении в малые водотоки, которые формируются в зоне таяния многолетней мерзлоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования водных экстрактов из разных слоев почв, отобранных на специфических ландшафтах – марях, свидетельствуют о существенном изменении численности и структуры МК в слое, непосредственно контактирующем с многолетней мерзлотой. Установлены значимые различия в спектральных характеристиках водных экстрактов почв из активного слоя в зависимости от места отбора образцов, их состава (почвенные коллоиды, растительный детрит, мхи, частицы глины) и присутствия многолетней мерзлоты под марями в долинах разных притоков. Значительные запасы ОБ, освобождаясь при таянии многолетней мерзлоты, вовлекаются в разнообразные биогеохимические процессы в активном слое почв (сезонно-мерзлые почвы) и поступают в водные экосистемы, изменяя их качественный состав. Показано, что гуминовые вещества могут разлагаться микробными комплексами при разных температурах (2 °С, 23 °С), обеспечивая сток растворенных алифатических и ароматических ОБ. Качественный состав продуктов микробного метаболизма определяется генезисом автохтонных высокомолекулярных веществ, зависит от их стойкости к ферментативному разложению и активности микроорганизмов-деструкторов.

Вынос алифатической и ароматической составляющей растворенных ОБ из активного слоя в водотоки определяется составом и локализацией отобранных почвенных образцов,

активностью микробных комплексов, присутствием таких макроэлементов, как Fe, Mn, Al и наличием многолетней мерзлоты.

Принимая во внимание концепцию “речного континуума” биогеохимические процессы взаимодействия растворенных ОБ с разными элементами приобретают особое значение для оценки влияния малых водотоков в зонах многолетней мерзлоты на крупные речные системы и их трофический статус.

ЛИТЕРАТУРА

- Мордовин А. М., Шестеркин В. П., Антонов А. Л. Река Буря: гидрология, гидрохимия, ихтиофауна. Хабаровск: ДВО РАН, 2006. 149 с.
- Мурашова Е. Г. Заболачивание в Приамурье // Строительство и природообустройство: сб. науч. тр. / отв. ред. М. В. Маканикова. Благовещенск: Изд-во ДВ ГАУ, 2016. С. 72–75.
- 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.
- Намсараев Б. Б., Хасинов В. В., Турунхаев А. В. Болотные экосистемы перешейка полуострова Святой Нос // География и природ. ресурсы. 2009. № 4. С. 66–71.
- Новороцкий П. В. Многолетнее изменение температуры воздуха в бассейне реки Буря // География и природ. ресурсы. 2013. № 2. С. 118–124.
- Хилько С. Л., Рогатко М. И., Макарова Р. А., Семенова Р. Г., Невечеря О. И., Хилько А. С. Механохимический синтез аминопроизводных гуминовых кислот и реологические характеристики их адсорбционных слоев на границе раздела жидкость-газ // Вестн. НовГУ. Сер. Технические науки. 2020. № 5. С. 113–116.
- Шестеркин В. П. Гидрохимия реки Тырма // Региональные проблемы. 2021. Т. 24, № 2–3. С. 47–51.
- Ширшова 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. 19, № 4. С. 107–113.
- 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. Vol. 75. P. 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. Vol. 94. P. 255–270.
- Chen J., Gu B., LeBoeuf E. J., Pan H., Dai S. Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of natural organic matter fractions // *Chemosphere*. 2002. Vol. 48. P. 59–68.
- Deng J., Gu Y., Zhang J., Xue K., Qin Y., Yuan M., Yin H., He Z., Wu L., Schuur E. A. G., Tiedje J. M., Zhou J. Shifts of tundra bacterial and archaeal communities along a permafrost thaw gradient in Alaska // *Mol. Ecol*. 2015. Vol. 24, N 1. P. 222–234.
- Exley C. A. Biogeochemical cycle for aluminum? // *J. Inorg. Biochem*. 2003. V. 397. P. 1–7.
- Fukumasu J., Poeplau C., Coucheney E., Jarvis N., Klof-fel T., Koestel J., Katterer T., Nimblad Svensson D., Wetterlind J., Larsbo M. Oxalate-extractable aluminum alongside carbon inputs may be a major determinant for organic carbon content in agricultural topsoils in humid continental climate // *Geoderma*. 2021. Vol. 402, N 115345.
- Hebsgaard M. B., Phillips M. J., Willerslev E. Geologically ancient DNA: fact or artefact? // *Trends Microbiol*. 2005. Vol. 13. P. 212–220.
- Herndon E. M., Yang Z., Bargar J., Janot N., Regier T. Z., Graham D. E., Wulfschlegel S. D., Gu B., Liang L. Geochemical drivers of organic matter decomposition in arctic tundra soils. *Biogeochemistry*. 2015. Vol. 126. P. 397–414.
- Hugelius G., Loisel J., Chadburn S., Jackson R. B., Jones M., MacDonald G., Marushchak M., Olefeldt D., Packalen M., Siewert M. B., Treat C., Turetsky M., Voigt C., Yu Z. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw // *Proc. Natl. Acad. Sci*. 2020. Vol. 117. P. 20438–20446.
- Kumar S. Organic chemistry. Spectroscopy of Organic Compounds. Guru Nanak Dev University, 2006. 36 p.
- Lim A. S., Loiko S. V., Pokrovsky O. S. Sizable pool of labile organic carbon in peat and mineral soils of permafrost peatlands, western Siberia // *Geoderma*. 2022. Vol. 409. 115601.
- 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 // *Environ. Res. Lett*. 2021. Vol. 16, № 2. e 024036.
- 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 // *Environ. Res. Lett*. 2014. Vol. 9. 035005.
- Patzner M. S., Mueller C. W., Malusova M., Baur M., Nikleit V., Scholten T., Hoeschen C., Byrne J. M., Borch T., Kappler A., Bryce C. Iron mineral dissolution releases iron and associated organic carbon during permafrost thaw // *Nat. Commun*. 2020. Vol. 11. P. 1–11.
- Perminova I. V. From green chemistry and nature-like technologies towards ecoadaptive chemistry and technology // *Pure and Appl. Chem*. 2019. Vol. 91, N 5. P. 851–864.
- Pokrovsky O. S., Manasypov R. M., Loiko S. V., Krickov I. A., Kopysov S. G., Kolesnichenko L. G., Vorobyev S. N., Kirpotin S. N. Trace element transport in western Siberian rivers across a permafrost gradient // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13. P. 1877–1900.
- Prater I., Zubrzycki S., Buegger F., Zoor-Füllgraff L. C., Angst G., Dannenmann M., Mueller C. W. From fibrous plant residues to mineral-associated organic carbon – the fate of organic matter in Arctic permafrost soils // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17, N 13. P. 3367–3383.
- Quinton W. L., Hayashi M., Chasmer L. E. Peatland hydrology of discontinuous permafrost in the Northwest Ter-

- ritories: overview and synthesis // *Can. Water Resour. J.* 2009. Vol. 34. P. 311–328.
- Raudina T. V., Loiko S. V., Lim A. G., Krickov I. V., Shirokova L. S., Istigechev G. I., Kuzmina D. M., Kulizhsky S. P., Vorobyev S. N., Pokrovsky O. S. Dissolved organic carbon and major and trace elements in peat pore water of sporadic, discontinuous, and continuous permafrost zones of western Siberia // *Biogeosciences*. 2017. Vol. 14, N 14. P. 3561–3584.
- Rivkina E., Laurinavichius K., McGrath J., Tiedje J., Shcherbakova V., Gilichinsky D. Microbial life in permafrost // *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 33. P. 1215–1221.
- 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, N 3. G03006.
- Schlesinger W. *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*. Academic Press 3rd Edition, 2013. 688 p.
- Schumann R., Schiewer U., Karsten U., and 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. P. 137–150.
- Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schadel C., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520, N 7546. P. 171–179.
- Shamov V. V., Onishi T., Kulakov V. V. Dissolved Iron Run-off in Amur Basin Rivers in the Late XX Century // *Water Resour.* 2014. Vol. 41. P. 201–209.
- Shirokova L. S., Chupakov A. V., Zabelina S. A., Neverova N. V., Payandi-Rolland D., Causserand C., Karlsson J., Pokrovsky O. S. Humic surface waters of frozen peat bogs (permafrost zone) are highly resistant to bio- and photodegradation // *Biogeosciences*. 2019. Vol. 16. P. 2511–2526.
- 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. P. 513–523.
- Stolpe B., Guo L., Shiller A. M., Aiken G. R. Abundance, size distribution and trace-element binding of organic and iron-rich nanocolloids in Alaskan rivers, as revealed by field flow fractionation and ICP-MS // *Geochim. Cosmochim. Ac.* 2013. Vol. 105. P. 221–239.
- Tadini A. M., Moreira A. B., Bisinoti M. C. Fractionation of aquatic humic substances and dynamic of chromium species in an aquatic body influenced by sugarcane cultivation // *J. Brazilian Chem. Soc.* 2014. Vol. 25, N 1.
- 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. doi:10.3390/w12092579
- Vishnivetskaya T., Petrova M. A., Urbance J., Ponder M., Moyer C. L., Gilichinsky D. A., Tiedje J. M. Bacterial community in ancient Siberian permafrost as characterized by culture and culture-independent methods // *Astrobiology*. 2006. Vol. 6. P. 400–414.
- Wauthy M., Rautio M., Christoffersen K. S., Forsström L., Laurion I., Mariash H. L., Peura S., Vincent W. F. Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw // *Limnol. Oceanogr. Lett.* 2018. Vol. 3, N 3. P. 186–198.
- 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.
- Zhang R., Leiviskä T., Taskila S., Tanskanen J. Iron-loaded Sphagnum moss extract residue for phosphate removal // *J. Environ. Management*. 2018. Vol. 218. P. 271–279.

Features of the organic matter transformation in the active layer of permafrost in the Bureya river basin

L. M. KONDRATYEVA¹, D. V. ANDREEVA¹, Z. N. LITVINENKO¹, V. P. SHESTERKIN¹, E. M. GOLUBEVA²

¹*Khabarovsk Federal Research Center Institute of the Water and Ecology Problems FEB RAS
680000, Khabarovsk, Dikopoltsev str., 56
E-mail: freckles2008@yandex.ru*

²*Yu. A. Kosygin Institute of Techtonics and Geophysics FEB RAS
680000, Khabarovsk, Kim-Yu-Chen str. 65*

Climate change contributes to increased attention on factors determined the dynamics of biogeochemical processes in active layer of biosphere (seasonally thawing/freezing soils) on the border with permafrost. There are geological, geomorphic, weather conditions associated with atmospheric precipitations, which determine the differences in the segregation and depth of permafrost thawing in different regions. Research area is Bureya River Basin with intermittent distribution of permafrost within unique landscape units – marshes. It is formed in swampy, poorly drained areas, where the active soil layer is in contact with permafrost, and has a direct impact on the quality of surface waters. The results of the study include the information about composition of water in different order tributaries by hydrochemical parameters; spectral characteristics of soluble organic matters (OM) in water extracts of soils from different horizons of the active layer; assessment of the activity of microbial complexes in relation to humic substances depending on the permafrost depth. The heterogeneity of landscapes is an important factor influencing the transport of OM into watercourses. Microbial complexes of the active layer involved in the transformation of humic substances played a decisive role in changing the composition of soluble OM. It was experimentally shown that temperature influences the qualitative composition of humic metabolism products, including the ratio between aliphatic, aromatic fragments and chromophore groups responsible for the color of natural waters.

Key words: water composition, permafrost, active layer, microbial complexes, humic substances.