

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.512

ХИМИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ПОЛОВОДЬЯ НА МАЛОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ВОДОСБОРЕ ПРИЛЕНСКОГО ПЛАТО, РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ)¹

© 2023 г. В. В. Шамов^{a, b, *}, Т. Н. Луценко^a, Л. С. Лебедева^b, А. М. Тарбеева^c,
В. С. Ефремов^b, Н. А. Павлова^b, М. И. Ксенофонтова^d

^aТихоокеанский институт географии ДВО РАН,
Владивосток, 690041 Россия

^bИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
Якутск, 677010 Россия

^cМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119234 Россия

^dНаучно-исследовательский институт проблем экологии
Севера Северо-восточного федерального университета, Якутск, 677000 Россия

*e-mail: vlshamov@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.03.2022 г.

После доработки 29.03.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Обсуждены теория, методы и некоторые результаты четырехлетних натурных исследований процессов формирования стока на перемерзающем малом экспериментальном речном водосборе в сплошной мощной (400 м) криолитозоне (Республика Саха (Якутия)) с помощью данных о химическом составе природных вод. Дан анализ сезонной и суточной динамики стока реки в теплый период, содержания некоторых растворенных веществ в различных типах вод, а также роли русловых расширений, озер, надмерзлотных вод и наледей в образовании стока. Описаны разные типы связи расходов воды и содержания некоторых растворенных веществ на фоне меняющихся гидротермических условий. Дана оценка участия непромерзающих озеровидных русловых расширений (бочагов) в регулировании весеннего стока воды и растворенных веществ. Обсуждена эффективность автоматической цифровой регистрации уровня, температуры и удельной электропроводности воды с высоким временным разрешением на гидрологических постах, особенно при изучении быстро протекающих процессов в реке.

Ключевые слова: стокоформирование, растворенные вещества, многолетняя мерзлота, малый водосбор, озеровидные русловые расширения (бочаги), индикация.

DOI: 10.31857/S0321059623030124, **EDN:** CXJXHW

ВВЕДЕНИЕ

Процессы движения воды и миграции растворенных веществ (РВ) в пределах заданного ландшафта неразрывно связаны между собой. Химический состав речных вод в замыкающем створе меняется во времени в зависимости от смешения различных источников стока и поэтому может рассматриваться как некий “отпечаток” сложного комплекса процессов переноса, смешивания, разбавления и взаимодействия РВ. Изменения соотношения концентрации C и расхода воды Q (далее $C-Q$) могут сильно варьировать для разных

РВ и водосборов, в связи с этим они широко используются в качестве индикаторов (дескрипторов) гидрологического режима реки [16, 22, 26, 34]. Соотношения $C-Q$, полученные из многолетних рядов низкочастотных данных, могут быть полезны для описания усредненных ландшафтно-гидрологических характеристик водосборов [17, 18, 21]. Современные технологии мониторинга позволяют регистрировать характеристики речных потоков, а также содержание некоторых РВ в водах рек и потенциальных источников их питания с суточным, часовым и более детальным временным разрешением [23, 26]. Именно современные регистраторы (логгеры), установленные *in situ*, позволили заключить, что общая вариабельность содержания РВ при отдельных событиях обычно превышает таковую, основанную на результатах

¹ Исследование выполнено в рамках работ по теме госзадания № 0272-2019-0027 (ТИГ ДВО РАН), по базовому проекту НИОКТР № 122012400106-7 (ИМЗ СО РАН) и базовому проекту № 121051100166-4 (МГУ).

анализа еженедельных или ежемесячных проб воды [13, 27, 29]. Это означает, что механизмы аккумуляции, миграции и перераспределения РВ в речном бассейне за время прохождения половодий и паводков (т. е. в синоптическом и сезонном временном масштабе) существенно отличаются от геохимических процессов, рассматриваемых в межгодовом и многолетнем разрезе.

Многолетняя мерзлота – мощный биогеохимический фактор миграции химических элементов в ландшафтах [8]. В связи с изменениями глобального и регионального климата, ставшими причиной деградации мерзлоты в последние десятилетия, широко исследуются гидрологические и биогеохимические условия выноса растворенных и взвешенных веществ крупными арктическими реками [4, 19, 20, 24, 33]. В силу удаленности от населенных пунктов и связанной с этим трудоемкости организации систематических наблюдений гораздо меньше внимания в этом плане уделяется малым рекам, в бассейнах которых формируются начальные миграционные потоки, контролируемые процессами взаимодействия воды и мерзлых пород [14, 15, 25, 30, 31].

Цель данной работы – исследование связей содержания РВ и водности реки в половодье в бассейнах перемерзающих рек криолитозоны в рамках развития методов химической индикации процессов взаимодействия надмерзлотных и поверхностных вод.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования на экспериментальном водосборе р. Шестаковки (Центральная Якутия, площадь – 170 км²) в 2016–2019 гг. позволили осветить содержание основных компонентов состава природных вод разных типов, а также процессы их трансформации в связи с изменением гидрологических условий. Климат района исследований резко континентальный, среднегодовая температура воздуха составляет –9.4°C, средняя температура июля +19.5°C, января –38.6°C, среднее годовое количество осадков 238 мм.

Бассейн р. Шестаковки достаточно хорошо изучен [2, 3]. Водосбор реки представляет собой холмистую равнину (цокольные высокие левобережные террасы Лены высотой 200–300 м абс.), сложенную полевошпатовыми песками, с преимущественно эоловым рельефом плейстоценового возраста [11]. Мощность многолетней мерзлоты здесь колеблется в пределах 200–400 м, местами достигая 500 м; глубина сезонно-талого слоя меняется от 0.4 м в заболоченных понижениях и листовничных марях до 4 м на песчаных массивах в междуречьях [3]. Преобладают мерзлотные таежные почвы, зональный тип растительности – брусничная листовничная тайга.

Сосновые леса на песчаных массивах занимают 47% площади водосбора, листовнично-березовые леса – 38, мари и болота – 14 и озера – 1%. Наиболее крупные озера, образовавшиеся в котловинах выдувания, – Большая Чабыда и Малая Чабыда, Кюрдегелях и Туой. В сухих слабозадернованных песчаных массивах, закрепленных сосновым лесом, на глубине 3–5 м обнаруживаются надмерзлотные субэральные талики, которые занимают ≥20% площади водосбора [7, 12].

С 1951 г. стандартные наблюдения проводятся Якутским УГМС на гидрологическом посту Камырдагыстах (61°56' с.ш., 129°33' в.д.), контролирующем площадь водосбора, равную 170 км². Весной 2016 г. выше участка появления стока в сужении долины р. Левая Шестаковка был организован сезонный пост “Верхний” (61°57' с.ш., 129°20' в.д.), контролирующей наименее затронутую человеком верхнюю часть водосбора площадью 90 км².

Средний многолетний годовой слой жидких осадков, выпадающих на водосбор р. Шестаковки у поста Камырдагыстах, составляет 165 мм, слой твердых осадков – 75 мм, подземный сток таликов – 80–90 мм, речной сток – 25 мм. Испарение с поверхности снега в лесу оценено в 6 мм/год и на открытых участках – 13 мм/год; в сосновых, листовнично-березовых лесах, с поверхности марей и озер оно составляет соответственно 180, 220, 400 и 240 мм/год. Максимальные снеготалы достигают к концу зимы 58 мм. Доля подземного питания реки таликовыми водами оценивается в среднем в 68% стока. Средний многолетний слой стока, формируемого мерзлотными ландшафтами – сосновыми и листовнично-березовыми лесами, составляет 50 и 15 мм/год соответственно. Озера и мари способствуют потерям стока на испарение, средняя величина которых оценивается в 172 и 12 мм/год соответственно.

В данной работе использованы результаты химического анализа проб воды, измерений расходов воды на гидрологических постах с помощью расходомера “FlowSens SEBA” и вертушки “ГР-21М”, а также данные непрерывной регистрации уровня, температуры и удельной электропроводности воды с помощью системы автоматического мониторинга “САМ-ПР5” [6]. Участки, где регулярно отбирались пробы воды, включали в себя два упомянутых гидрологических поста на реке, отдельные озеровидные расширения в районе поста “Верхнего”, три озерных поста (оз. Большая Чабыда и Малая Чабыда, Кюрдегелях), листовничную марь выше поста “Верхний”, четыре скважины в районах распространения субэральных таликов и один наледный пост (рис. 1).

В районе оз. Кюрдегелях непрерывно работает автоматическая метеостанция Novo Onset, RG3-M.

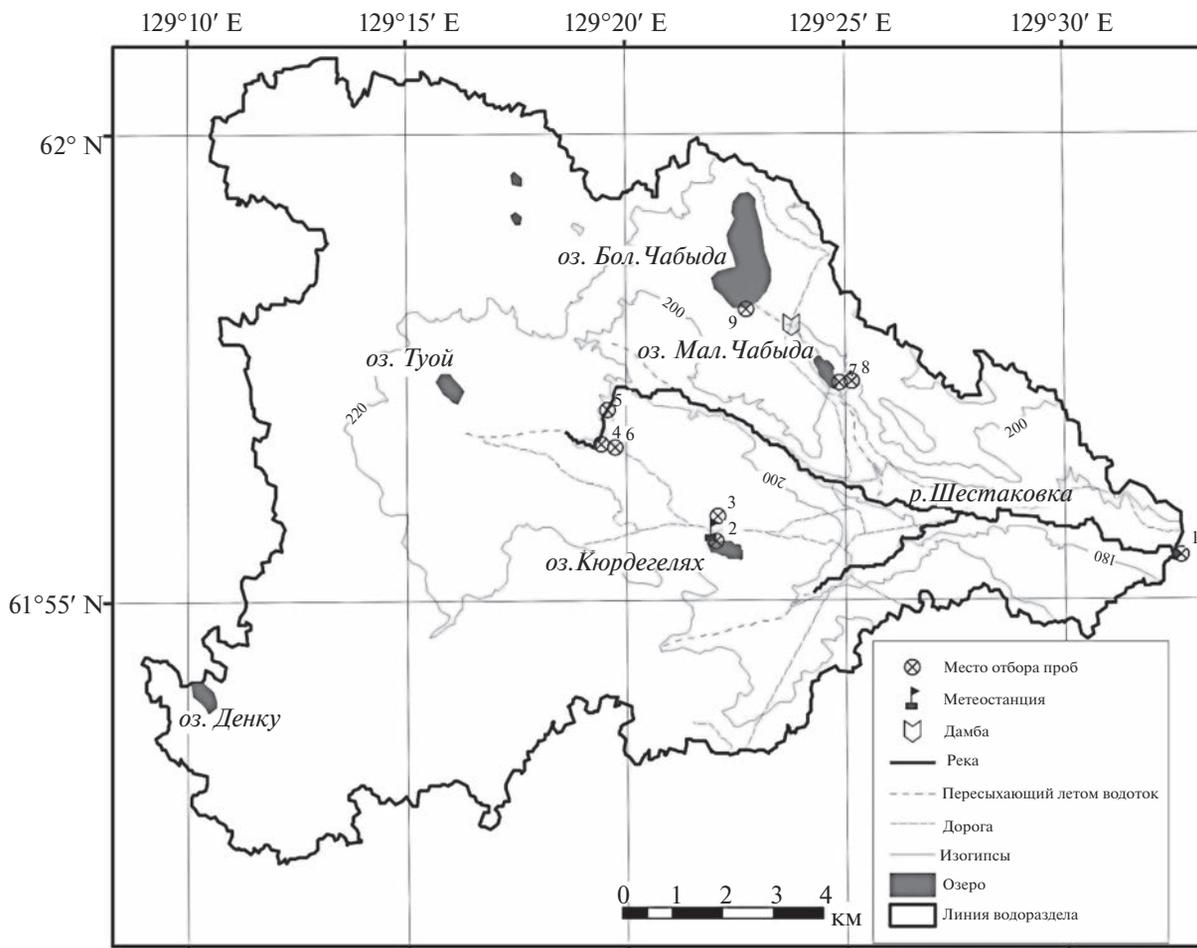


Рис. 1. Картограмма района исследований. 1 – гидрологический пост Камырдагыстах; 2 – пост на оз. Кюргедеях; 3 – станция отбора дождевых проб и метеостанция; 4 – места отбора проб маревых и наледных вод; 5 – гидрологический пост Верхний; 6, 7, 8 – гидрогеологические скважины; 7 – пост на оз. Малая Чабыда; 9 – пост на оз. Большая Чабыда.

Вблизи нее в теплое время года с помощью пластиковой тары, установленной на открытом месте на высоте 3 м, отбирались пробы дождевых вод. В конце холодного периода года эпизодически отбирались пробы снега.

При отборе проб определялись температура, рН, Eh и удельная электропроводность воды с помощью портативных термокондуктометров “YSI Professional Plus” (США), “WTW” (ФРГ) и “НМ-200” (Республика Корея). В день отбора пробы доставлялись в лабораторию подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Пробоподготовка и анализ компонентов химического состава вод выполнялись по стандартным гидрохимическим методикам. Концентрации растворенного органического углерода (РОУ) определяли в ЦКП ЦЛЭДГИС ТИГ ДВО РАН методом термодинамического окисления с ИК-регистрацией (анализатор “ТОС-Verpн”, “Shimadzu”, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Состав РВ в пробах вод различного генезиса

Основные источники, формирующие сток воды р. Шестаковки, – атмосферные осадки, воды таликов и сезонно-талого слоя, временные водооттоки на листовенных марях, таликовые наледы, а также – во время повышенной водности – озера.

Изученные воды – пресные (озера) и ультрапресные. Они имеют преимущественно гидрокарбонатный, кальциевый или смешанный катионный состав, а их реакция меняется от кислой до нейтральной (табл. 1).

Практически во всех типах вод, за исключением атмосферных осадков, в период исследования проявляются процессы криогенной трансформации их состава [1, 5]. Изучаемые воды особенно контрастно различаются по диапазону концентраций РОУ (табл. 1). Атмосферные осадки, наледные и таликовые воды бесцветны, концентра-

Таблица 1. Характеристика макросостава природных вод бассейна р. Шестаковки (М – минерализация, формулы Курлова и содержание РОУ в пробах озерных и речных вод приведены для периода половодья (апрель–май), РОУ проанализирован не во всех пробах, в которых определялся макросостав)

Тип вод	Количество проб	М, мг/л	Формула по М.Г. Курлову	РОУ, мг/л
Снеговые	11	$\frac{8-20}{13.3}$	$M_{0.013} \frac{HCO_3^- 71 [Cl^- 15 SO_4^{2-} 9 NO_3^- 5]}{Ca^{2+} 38 [Mg^{2+} 20 Na^+ 19 NH_4^+ 16 K^+ 8]} pH 5.59$	$\frac{0.3-1.7}{1.0}$
Дождевые	20	$\frac{3-26}{12}$	$M_{0.012} \frac{HCO_3^- 75 [SO_4^{2-} 12 Cl^- 8 NO_3^- 5]}{Ca^{2+} 48 Mg^{2+} 27 [NH_4^+ 10 Na^+ 10 K^+ 5]} pH 5.48$	$\frac{3.3-11.4}{7.1}$
Маревые (половодье)	37	$\frac{12-55}{28}$	$M_{0.028} \frac{HCO_3^- 78 [SO_4^{2-} 13 Cl^- 8]}{Ca^{2+} 45 [Na^+ 22 Mg^{2+} 19 K^+ 11]} pH 4.53$	$\frac{12-18}{14.9}$
Наледные	4	$\frac{9-35}{26}$	$M_{0.026} \frac{HCO_3^- 81 [SO_4^{2-} 13 Cl^- 5]}{Ca^{2+} 52 [Na^+ 22 Mg^{2+} 21 NH_4^+ 4]} pH 6.97$	$\frac{1.3-1.8}{1.5}$
Бочаговые (русловых расширений)	7	$\frac{50-200}{153}$	$M_{0.05-0.20} \frac{HCO_3^- 82-93 [SO_4^{2-} 2-13 Cl^- 2-11]}{Ca^{2+} 34-41 Mg^{2+} 27-44 [Na^+ 18-27 K^+ 1]} pH 5.48-6.13$	$\frac{34-85}{56}$
Таликовые (скважина 3-16)	21	$\frac{19-57}{41}$	$M_{0.041} \frac{HCO_3^- 72 [SO_4^{2-} 22 Cl^- 4 NO_3^- 2]}{Na^+ 33 Ca^{2+} 32 Mg^{2+} 26 [K^+ 7 NH_4^+ 2]} pH 5.95$	4.0
Таликовые (скважины 15, 28ц и 38)	93	$\frac{23-86}{47}$	$M_{0.047} \frac{HCO_3^- 80 [SO_4^{2-} 12 Cl^- 7]}{Ca^{2+} 38 Na^+ 29 Mg^{2+} 27 [K^+ 4 NH_4^+ 2]} pH 5.52$	$\frac{4.0-8.3}{6.0}$
Озерные (Большая Чабыда)	20	$\frac{39-746}{368}$	$M_{0.368} \frac{HCO_3^- 89 [SO_4^{2-} 5 Cl^- 4 NO_3^- 1]}{Ca^{2+} 46 [Mg^{2+} 24 Na^+ 23 K^+ 5 NH_4^+ 1]} pH 6.76$	86.5
Озерные (Малая Чабыда)	51	$\frac{41-78}{63}$	$M_{0.063} \frac{HCO_3^- 85 [SO_4^{2-} 4 Cl^- 3 NO_3^- 8]}{Ca^{2+} 45 [Na^+ 24 Mg^{2+} 22 K^+ 5 NH_4^+ 4]} pH 6.12$	$\frac{42-76}{63}$
Озерные (оз. Кюрдегелях)	43	$\frac{9-174}{73}$	$M_{0.073} \frac{HCO_3^- 85 [SO_4^{2-} 6 Cl^- 5 NO_3^- 4]}{Ca^{2+} 40 [Mg^{2+} 29 Na^+ 20 NH_4^+ 4 K^+ 6]} pH 5.70$	$\frac{44-103}{72}$
Речные (Верхний)	84	$\frac{28-69}{47}$	$M_{0.047} \frac{HCO_3^- 81 [SO_4^{2-} 10 Cl^- 8 NO_3^- 2]}{Ca^{2+} 38 Mg^{2+} 27 [Na^+ 19 K^+ 11 NH_4^+ 2]} pH 5.54$	$\frac{26-74}{49}$
Речные (Камырдагыстах)	95	$\frac{33-59}{46}$	$M_{0.046} \frac{HCO_3^- 76 [SO_4^{2-} 14 Cl^- 8 NO_3^- 2]}{Ca^{2+} 39 Mg^{2+} 27 [Na^+ 22 K^+ 11 NH_4^+ 2]} pH 5.48$	$\frac{22-75}{53}$

ции РОУ в них составляют в основном единицы миллиграмм в литре. Ручьи марей, бочаговые и речные воды всегда имеют желтую окраску (от светло- до ярко-желтой и бурой), что соответствует десяткам миллиграмм в литре РОУ, который имеет, преимущественно, почвенно-растительное происхождение. Воды озер Большая Чабыда и Кюрдегелях, отобранные из-под льда, бесцветны, тогда как вода оз. Малая Чабыда, в отличие от

них, имеет зеленоватый оттенок. Концентрации РОУ в воде озер достигают десятков миллиграмм в литре, при этом состав озерного РОУ формируется в основном за счет развития и отмирания водной растительности.

По-видимому, в начале половодья самое большое влияние на мобилизацию растворенных соединений в реку оказывают подстилки и грубогу-

мусные горизонты почв сезонно-талого слоя, приуроченные к торфяным/торфянистым заболоченным ложбинам и марям. Именно на них, по авторским наблюдениям, поверхностное стекание талых вод в апреле начинается раньше всего.

Учитывая, что органический углерод составляет 40–50% в макромолекулах гуминовых кислот и фульвокислот, входящих в состав растворенного органического вещества (РОВ) рек [9, 28], приблизительный диапазон концентраций РОВ можно оценить в 50–200 мг/л в зависимости от динамики атмосферного увлажнения и условий промерзания–протаивания на водосборе. Таким образом, РОВ представляет собой главный растворенный компонент речных вод в период половодья (апрель–июнь) и продолжает играть важную роль в биогеохимических процессах в течение всего теплого периода.

Связь водного режима реки и динамики РВ

Основной объем стока реки формируется в период весеннего половодья. В конце апреля – начале мая отмечается резкий подъем уровней, их пик достигается обычно в первой декаде мая, а затем наблюдается медленный – до конца июня – спад, на который нередко накладываются дождевые паводки. Для реки также характерна весьма низкая летне-осенняя межень, прерываемая редкими паводками.

В середине–конце октября река промерзает до дна, сток прекращается. Непромерзшими остаются многочисленные русловые расширения (бочаги, или четки), которые зимой представляют собой рассредоточенные вдоль реки небольшие изолированные емкости речных вод и служат рефугиумами для гидробионтов [10]. В зимнее время сходство бочагов с озерами связано с криогенным перераспределением РВ, при котором образующийся лед (достигающий толщины ~1 м) содержит гораздо меньше солей и РОУ, чем отжимающийся концентрированный раствор. При этом подо льдом по мере расходования кислорода (к концу зимы местами полного) на дыхание и окисление аллохтонного и автохтонного ОВ образуется восстановительная среда. Но в сравнении с бочагами в озерах выше доля гидрокарбонатов кальция, более высокий (на 0.5–1.5) рН и другой состав РОУ.

В отдельные годы (например, в 2017 г.) благодаря летнему прогреву верхнего слоя воды и росту испарения в озерах могут возникать условия для повышения содержания ряда ионов (гидрокарбонатов, кальция, сульфатов, хлоридов) и РОУ. Атмосферные воды, а также поверхностные воды маревых ландшафтов сравнительно бедны РВ. Воды таликов (по откачкам из скважин) близки к речным водам по многим химическим показате-

лям, за исключением РОУ и отчасти сульфатов, хлоридов и др., но имеют контрастность в сезонной и межгодовой динамике. В целом источники питания речного стока по характеру РВ можно условно разделить на атмосферные, поверхностные, таликовые, озерные и бочаговые воды. При этом озерные воды существенно различаются между собой по химическому составу, видимо – за счет геолого-геоморфологических условий водообмена (табл. 1).

Наблюдения за динамикой уровня воды (УВ), удельной электропроводности (УЭ) и температуры (Т) воды в реке на двух постах с отборами проб воды на содержание большого ряда РВ охватывали практически весь период стока каждого из указанных лет и осветили различные фазы водного режима. Сезонные изменения связей $C-Q$ для двух гидрологических постов имеют, как правило, сильно нелинейный и неоднозначный характер, отражая сочетание различных групп источников питания реки в зависимости от фазы режима. На рис. 2а–2г в качестве примера приведена динамика соотношения $C-Q$ для некоторых РВ в 2019 г.

Связи $C-Q$ по их общему виду могут быть условно обозначены как прямая, обратная и индифферентная. Прямая связь отражает рост содержания РВ на фоне увеличения водности потока и обозначается как поведение вымывания (“flushing behavior” [21, 34]). В частности, такая динамика отмечена у гидрокарбонатов в период весеннего половодья в 2019 г. в связи с протаиванием и разгерметизацией русловых расширений и частичной разгрузкой бочаговых вод в реку (рис. 2а). Обратное соотношение величин $C-Q$, или поведение разбавления (“dilution behavior” [21, 34]), можно проиллюстрировать на примере поведения сульфатов и хлоридов при развитии половодья на р. Шестаковке (рис. 2б, 2в). При высоких (>0.4 м³/с) расходах воды в половодье сульфаты и хлориды проявляют хемостатиз (“chemostatic behavior” [21, 34]), когда процессы вымывания и разбавления РВ почти уравниваются, а содержание РВ мало зависит или практически не зависит от водности потока.

Редко связь содержания РВ и водности потока отчетлива, обычно она имеет размытый характер, в частности – испытывает так называемый гистерезис, т. е. зависимость от условий поступления РВ в поток. В соотношении $C-Q$ петля гистерезиса, траектория которой закручена против часовой стрелки (отрицательный тип связи, по терминологии в [32]), может отражать общее преобладание вымывания РВ над их разбавлением. Отрицательный тип связи прослеживается при анализе содержания гидрокарбонатов в речной воде. При

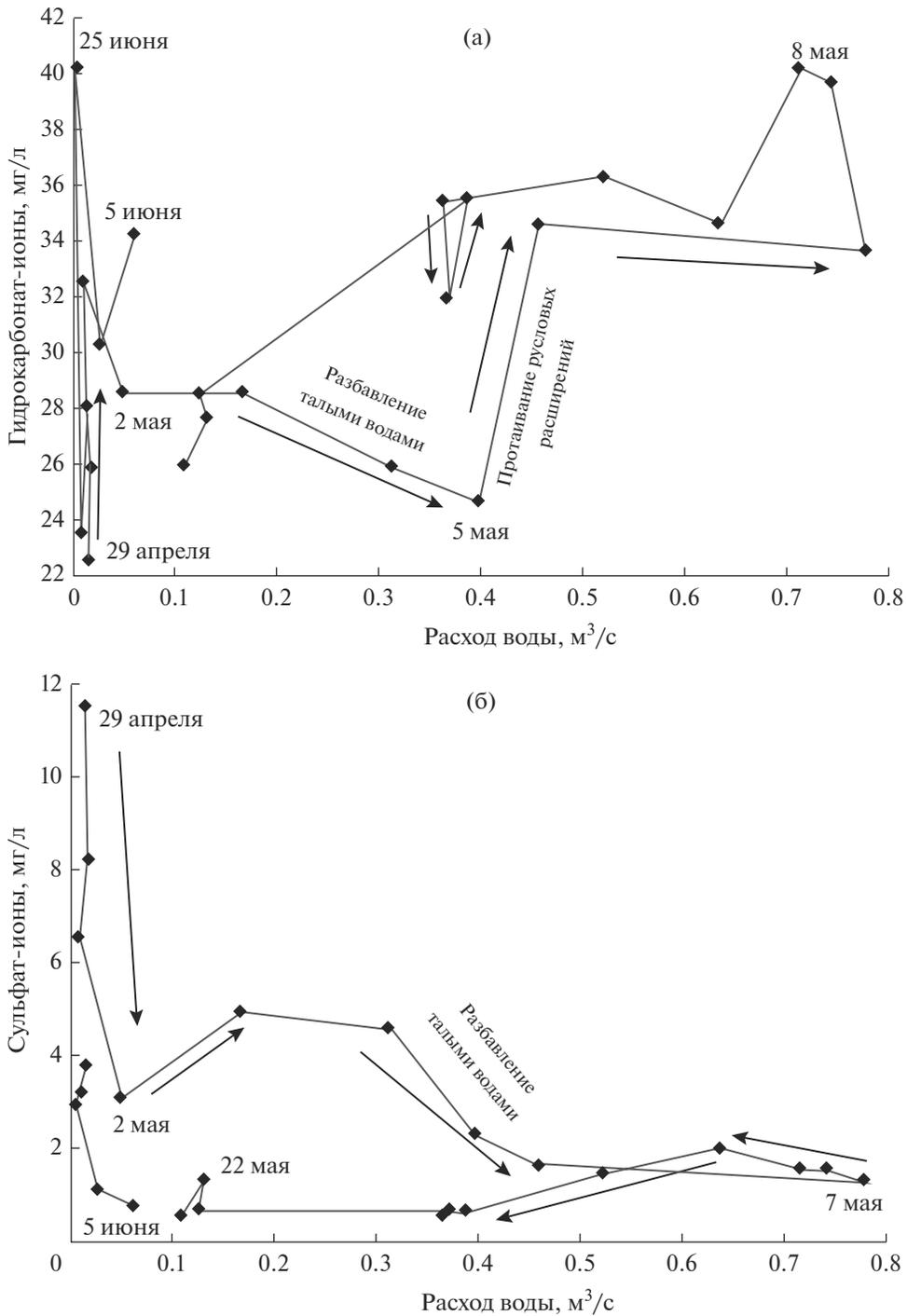


Рис. 2. Сезонная динамика соотношения $C-Q$, р. Шестаковка – пост Верхний, 2019 г.: а – гидрокарбонат-ионы, б – сульфат-ионы, в – хлорид-ионы, г – кальций. Стрелки – направление времени.

этом на подъеме половодья доминируют процессы разбавления речных вод тальми (снеговыми и маревыми), обедненными РВ. После превышения величины расхода воды $0.3 \text{ м}^3/\text{с}$ на соотношение $C-Q$ оказывает влияние, очевидно, разгрузка в речной поток бочаговых вод. Возможно, повышение содержания гидрокарбонатов вновь связа-

но с возрастанием участия бочагов в питании реки (участок траектории, соответствующий росту содержания РВ на фоне снижения водности) в начале спада половодья, а также с ростом доли озерных вод на спаде половодья и/или дождевого паводка, когда сток из озер происходит на фоне снижения доли талых вод в стоке. Отметим, что

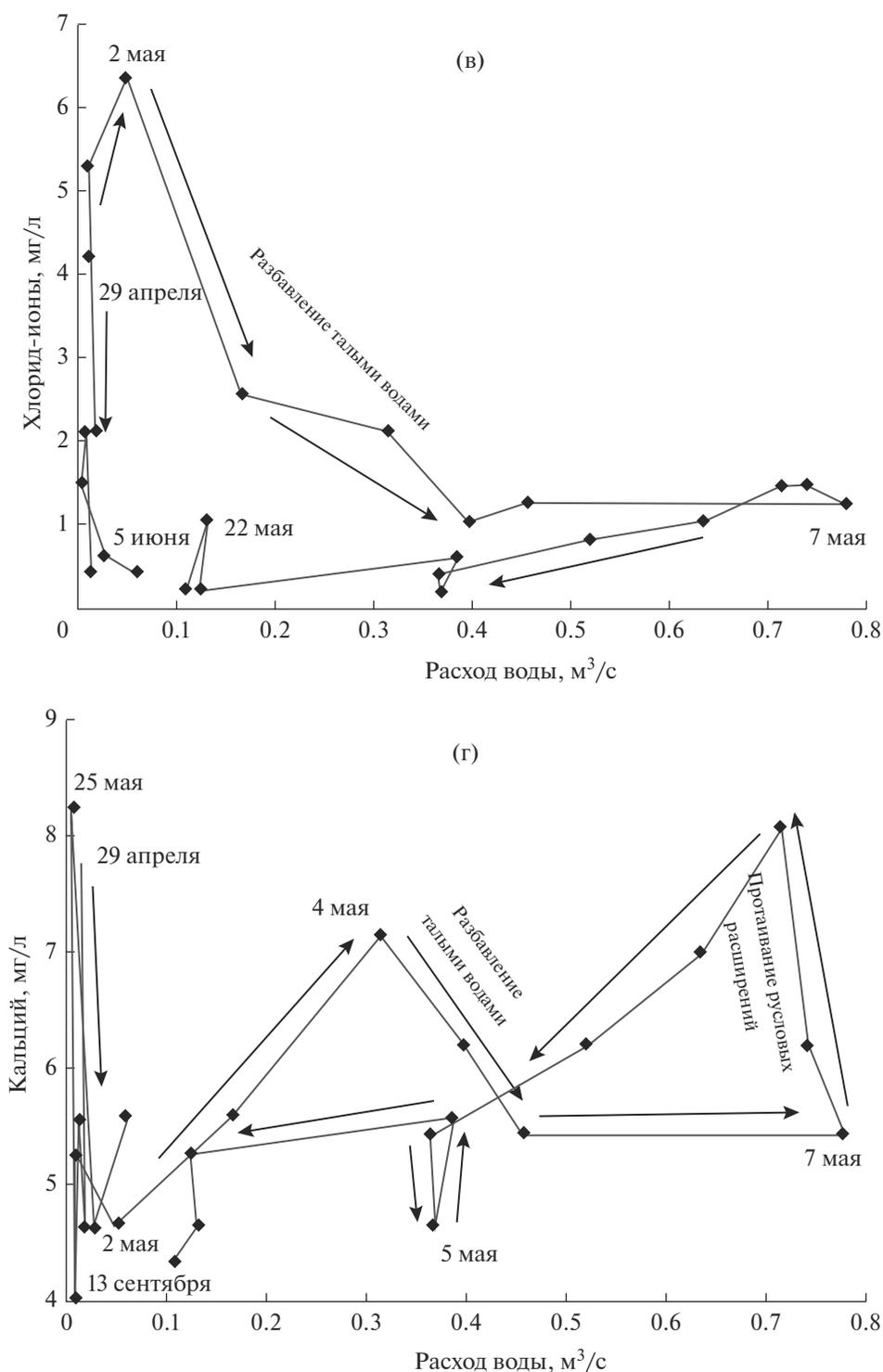


Рис. 2. Окончание.

воды бочагов и некоторых озер характеризуются содержанием гидрокарбонатов от десятков до первых сотен миллиграмм в литре (табл. 1).

Петля гистерезиса в соотношении $C-Q$, траектория которой ориентирована по часовой стрелке

(положительный тип связи [32]), в свою очередь указывает на интенсивное вымывание РВ в начале подъема уровней воды (активизация источников РВ); на преимущественное разбавление речной воды на спаде половодья/паводка более пресной талой и дождевой водой и/или на снижение

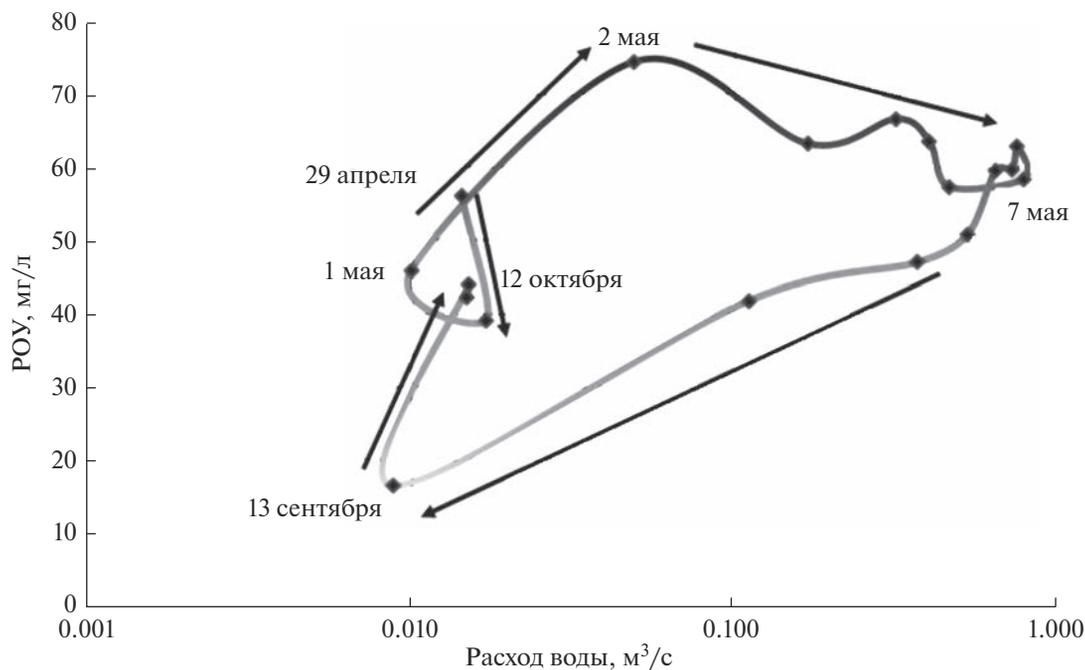


Рис. 3. Сезонная динамика соотношения $C-Q$, р. Шестаковка – пост Верхний, 2019 г. – РОУ. Горизонтальная ось задана в логарифмическом масштабе (lg). Стрелки – направление времени.

доли бочаговых и/или озерных вод в общем стоке. Такой характер связи $C-Q$ на фоне преобладания процессов вымывания прослеживается во время весеннего половодья у РОУ (рис. 3).

Близость значений РОУ в речной воде на посту Верхнем и в воде бочагов на фоне низких значений РОУ в талых водах дает основание считать протаявшие бочаги основным источником данных форм углерода в речных водах в половодье. Лиственничные мари, на которых образуются временные ручейки, сбрасывающие окрашенные талые воды в русло реки, служат источниками РОУ (а также сульфатов, кальция, магния и натрия) в речной воде в самом начале половодья, приходящемся на конец апреля – начало мая.

ОБСУЖДЕНИЕ

Весеннее половодье – основная фаза водного режима исследуемой реки. Доля стока весеннего половодья в годовом стоке исследуемой реки у гидропоста Камырдагыстах от года к году меняется от 3 до 82%, в апреле и мае проходит в среднем половина объема годового стока. Характер половодья контролируется в основном увлажнением предшествующего года, величиной снегозапасов и температурой приземного воздуха.

При появлении стока в начале половодья резкое повышение содержания хлоридов связано с поступлением в реку снеговых, маревых и – позже – бочаговых вод, где содержание хлоридов в среднем наиболее высокое среди всех типов вод:

средние за половодье – соответственно 2.0, 2.3 и ≥ 8 мг/л. Уровень содержания сульфатов в воде, текущей поверх льда, наоборот, в первые дни появления стока резко падает за счет притока в целом бедных сульфатами снеговых и маревых вод (соответственно 1.3 и 2.9 мг/л); затем некоторый рост содержания сульфатов, очевидно, обусловлен участием в питании реки такими относительно богатыми (≥ 8.5 мг/л) сульфатами водами, как воды русловых расширений. При этом указанный рост наблюдается при расходах в диапазоне от 0.05 до 0.15 м³/с, что существенно ниже пороговых значений для других РВ – 0.3–0.4 м³/с. Возможно, участие бочаговых вод в питании весеннего речного стока следует рассматривать с учетом достаточно устойчивой халинной стратификации воды в русловых расширениях: в питании реки участвуют преимущественно распресненные талыми водами приповерхностные объемы бочагов, а более насыщенные РВ глубокие бочаговые воды практически не взаимодействуют с речными водами. Подземные надмерзлотные воды, насыщенные сульфатами (8 мг/л), по всей видимости, не обеспечивают значимого вклада в половодный сток реки, но в период летней межени их участие, а также вклад в сток озерных вод становятся наиболее существенными (рис. 2б, 2в).

Иногда в соотношении $C-Q$ возникает двойная петля в форме условной “восьмерки”, когда ветви гистерезиса пересекаются. Примером этого может послужить поведение кальция в речной воде во время половодья в 2019 г. (рис. 2г), когда на

подъеме половодья при превышении расхода воды величины $0.3 \text{ м}^3/\text{с}$ процесс устойчивого поступления кальция (выщелачивание) в речной поток (вероятно, из сравнительно богатых кальцием вод с заболоченных маревых ложбин) сменился снижением его содержания в силу разбавления водами, обедненными кальцием, — снеговыми, дождевыми и, вероятно, наледными. Далее, в начале снижения водности содержание кальция резко возросло более чем в 1.5 раза — в питании реки возросла доля богатых кальцием бочаговых ($\geq 30 \text{ мг/л}$) и, не исключено, озерных вод (в оз. Большая Чабыда содержание кальция достигало 746 мг/л). Затем при дальнейшем спаде половодья до уровня, который наблюдался в начале подъема воды, устойчивое снижение вновь возобновилось на фоне атмосферного увлажнения и возможных (согласно прямым наблюдениям) напорных прорывов низкокальциевых надмерзлотных вод из таликов.

Расход воды $0.30\text{--}0.35 \text{ м}^3/\text{с}$, по всей видимости, соответствует некоторому пороговому состоянию реки, когда меняется роль русловых расширений: на стадии подъема половодья русловые расширения протаивают и начинают взаимодействовать с основным поверхностным потоком, текущим до этого поверх льда; после половодья их роль как источников РВ снижается, при этом соотношение $C\text{--}Q$ для гидрокарбоната, кальция и хлорида образует небольшой замкнутый цикл, ориентированный против часовой стрелки (рис. 2а, 2в, 2г), с короткой фазой разбавления и затем столь же короткой фазой выщелачивания. Этот эпизод, очевидно, требует более детального анализа с привлечением дополнительной информации.

Высокочастотная (в исследуемых случаях с 30-минутным разрешением) регистрация УВ, Т и УЭ воды обеспечивает возможность детального анализа процессов стокоформирования. В частности, в начале половодья и в период осеннего замерзания при общем нарастании водности потока и незначимых осадках УВ и Т воды в реке приобретают отчетливый суточный ход, причем колебания УВ находятся в противофазе с колебаниями Т (рис. 4).

Это объясняется ночными заморозками и, как следствие, уменьшением живого сечения потока при образовании зажоров в сужениях русла между бочагами, вызывающих подъем уровней воды в ночные часы. Рост Т воды способствует протаиванию русловых сужений и падению УВ в утренние часы.

Летняя суточная динамика характеристик потока обусловлена радиационным суточным ритмом и контролируемой им эвапотранспирацией, выступающей основным расходным элементом

годового водного баланса (в среднем $\sim 90\%$ среднего многолетнего годового слоя осадков).

Детальная регистрация УВ, Т и УЭ с помощью логгеров позволяет различать на фазовых диаграммах небольшие участки, в пределах которых связи между данными характеристиками однотипны, тесны и близки по характеру, а также — выявить моменты и условия смены таких состояний.

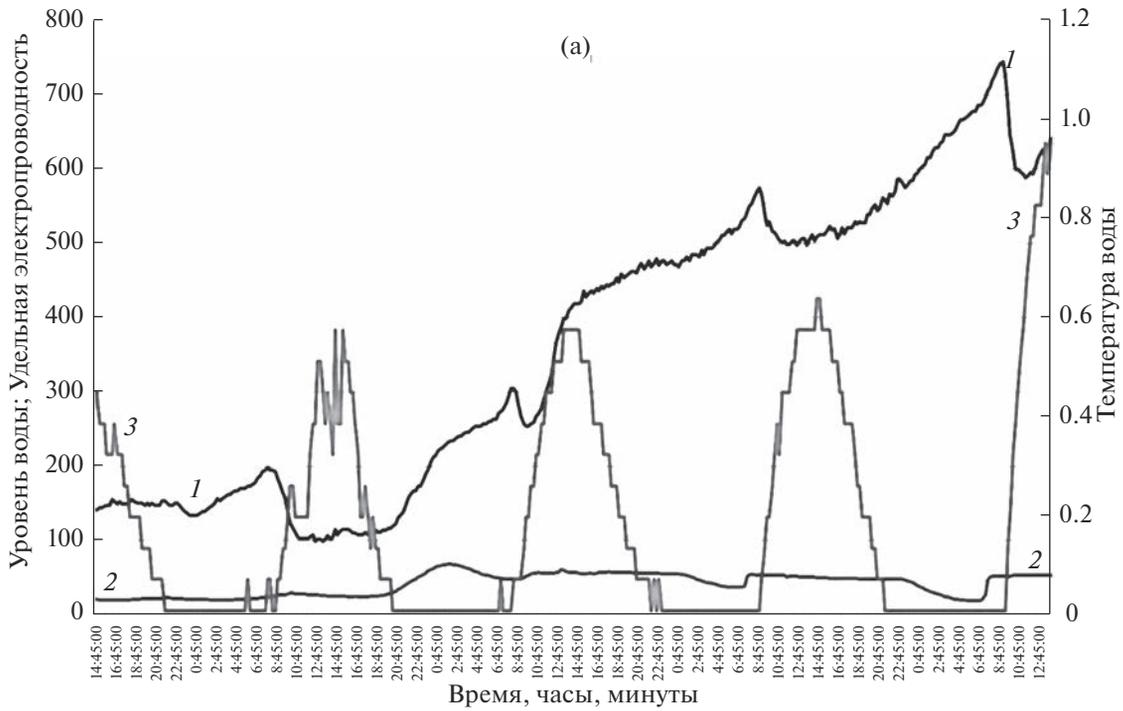
На рис. 5 отражена трансформация суточных циклов в соотношении УВ и УЭ в течение четырех майских дней в 2017 г., когда отмечались ночные заморозки, вызывающие резкие перепады УВ в течение суток.

В данный период интересны следующие моменты. Во-первых, теснота связи и амплитуда внутрисуточных колебаний двух характеристик сильно меняются от суток к суткам. Во-вторых, связь внутрисуточных УВ и УЭ имеет сложный нелинейный характер, тогда как межсуточная динамика показывает общую тенденцию снижения обеих характеристик во времени (это можно проследить по смещению суточных кривых до наступления высокой дневной температуры 13 мая). В-третьих, более тесная связь УВ—УЭ в масштабе суток характерна для ясных дней с большой амплитудой температуры воздуха (13 мая). В-четвертых, размытый характер связи, очевидно, связан с облачностью и осадками, нарушающими суточный радиационный цикл (10 и 11 мая). Осадки слабой интенсивности (в сумме 4.2 мм) наблюдались в дневные часы 10 мая.

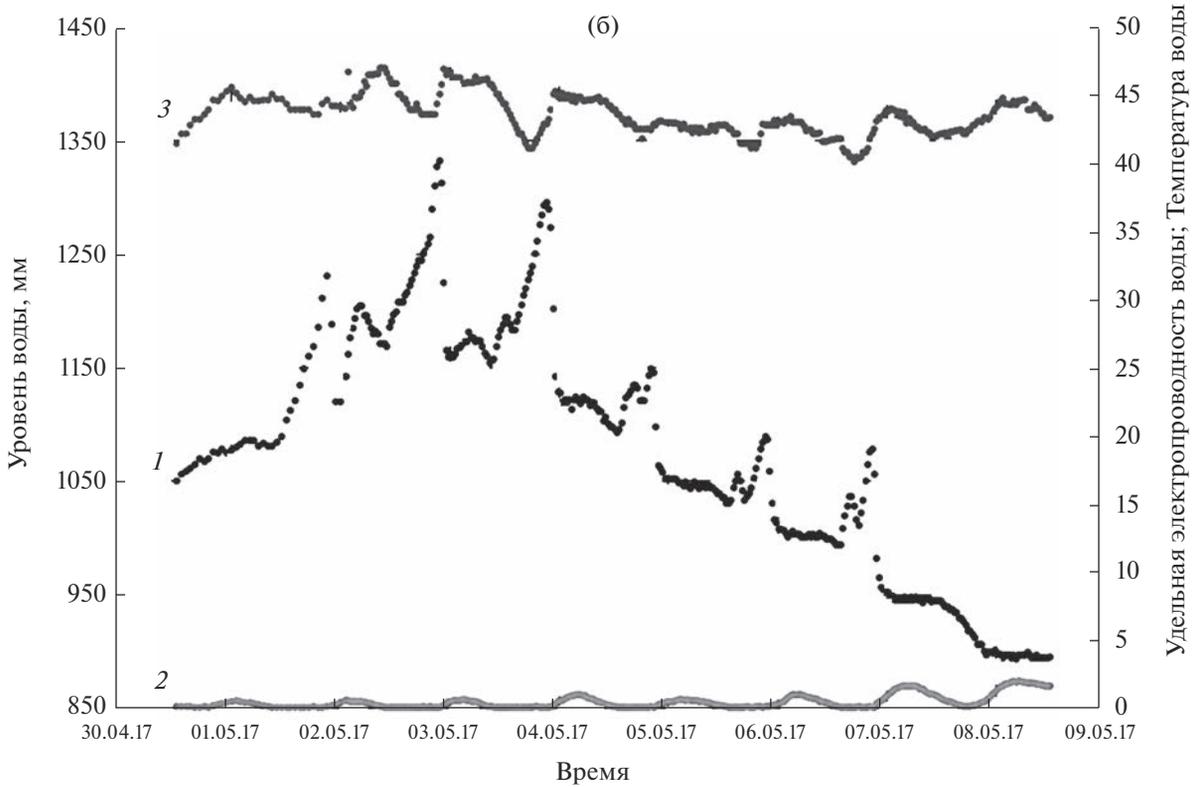
Значительна роль термических условий формирования стока половодья при общем неравномерном повышении температуры воздуха и прекращении ночных заморозков (рис. 6).

В период с 10 по 28 мая 2017 г. наблюдалось чередование дней с высокой температурой воздуха, когда ночные заморозки не регистрировались (13—15 и 22—25 мая), и холодных дней с заморозками (10—12, 16—22 и 26—28 мая), при этом наиболее значительные осадки (2.8 мм) были зарегистрированы 17 мая. В солнечные дни (17, 26 и 28 мая) суточная амплитуда колебаний температуры воздуха была близка к 20°C , и 28 мая отмечен последний весенний заморозок. Для всего рассматриваемого периода характерно общее снижение УВ, при этом рост УЭ воды отражает возрастание доли более минерализованных бочаговых вод в стоке реки в теплые дни (13—15 и 22—25 мая). Благодаря протаиванию русловых расширений. С 22 мая на фоне усиливающегося прогресса водосбора и замедления скорости падения УВ бочаговые воды начали в существенной мере контролировать сток реки. Последние весенние заморозки 26—28 мая уже не смогли изменить характер связи УВ—УЭ.

Содержание кальция, гидрокарбонатов, магния, натрия, аммонийного и нитратного азота,



1 – Уровень воды, мм 2 – Удельная электропроводность воды, МкС/см 3 – Температура воды, °С



1 – Уровень воды, мм 2 – Температура воды, °С 3 – Удельная электропроводность воды, мкС/см

Рис. 4. Динамика уровня воды, температуры и удельной электропроводности воды в начале половодья, р. Шестаковка – пост Верхний: а – 3–7 мая 2018 г.; б – 1–8 мая 2017 г.

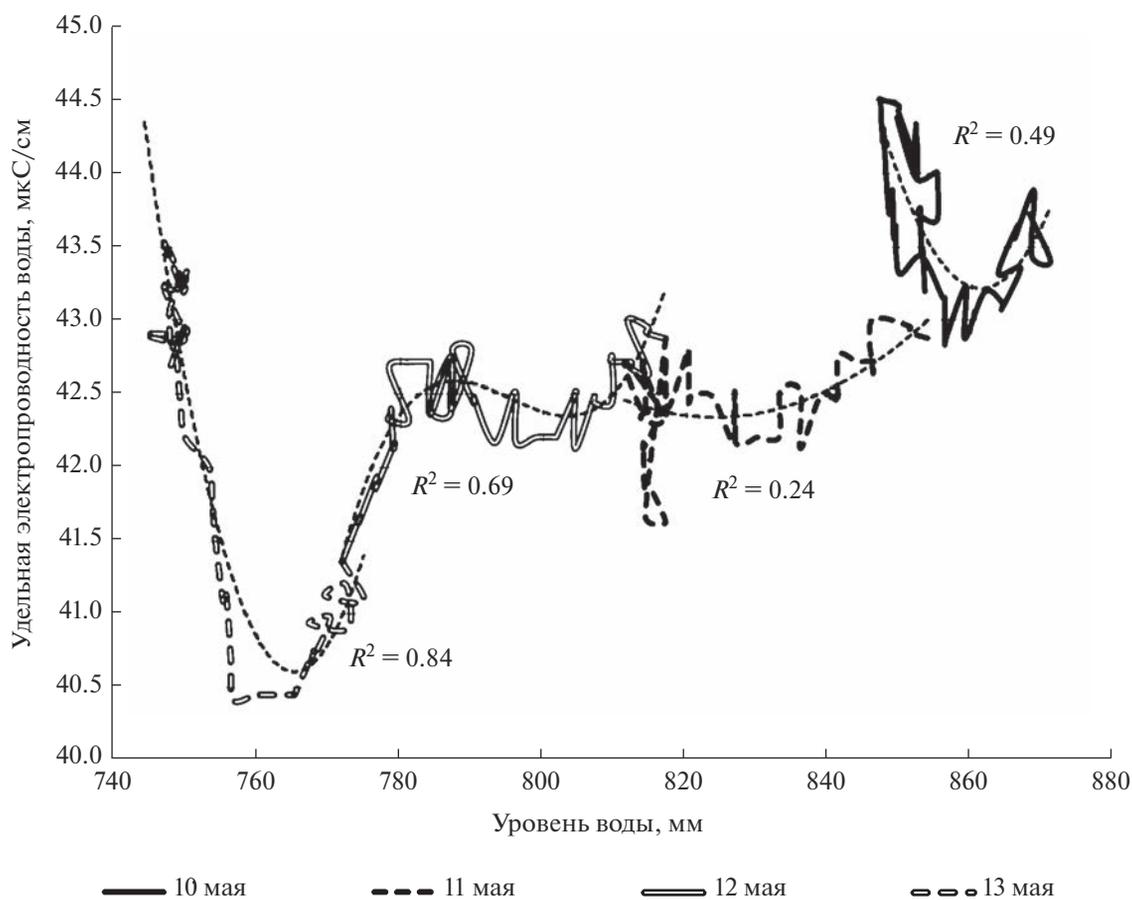


Рис. 5. Соотношение уровня воды и удельной электропроводности воды, р. Шестаковка – пост Верхний, 10–13 мая 2017 г.

хлорида и сульфата достигает двух и более максимумов в течение теплого периода, когда сток имеет место. По мере нарастания водности потока в период половодья протаивают русловые расширения, вода в них перемешивается [10] и начинает поступать в реку; содержание растворенного кислорода в бочагах, которое перед вскрытием часто исчезающе мало, нарастает.

В устойчивую летнюю межень на фоне низкого атмосферного увлажнения и интенсивного испарения повышение содержания ряда РВ может быть обусловлено их биогенным концентрированием, а также, вероятно, существенным вкладом вод сезонно-талого слоя, которые в зимний период испытывают криогенное концентрирование. Благодаря отчетливой летней температурной и биохимической стратификации воды в бочагах [10] содержание РОУ в речных водах при понижении водности также снижается.

ВЫВОДЫ

Речные воды экспериментального бассейна р. Шестаковки представляют собой комбинацию природных вод нескольких основных генетиче-

ских типов. Это воды снеговые, дождевые, маревые, наледные, воды русловых расширений – бочагов, озерные и таликовые (надмерзлотные). Они имеют разный химический состав, который определяется их генезисом, внутрисезонными и межсезонными колебаниями гидротермических условий, а также характером водообмена.

Изученные типы вод – ультрапресные (для озер – пресные), имеют преимущественно гидрокарбонатный кальциевый или смешанный катионный состав, рН – от слабокислого до нейтрального. Исследованные воды существенно отличаются по диапазону концентраций РОУ, который представляет собой главный растворенный элемент речных вод в период половодья (апрель–май) и, по всей вероятности, продолжает играть важную роль в биогеохимических процессах в дальнейшем вплоть до полного промерзания реки. РОУ наряду с такими РВ, как SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , может служить маркером типов вод, участвующих в питании речного стока.

Данные о внутрисезонной динамике связей C-Q позволяют анализировать процессы форми-

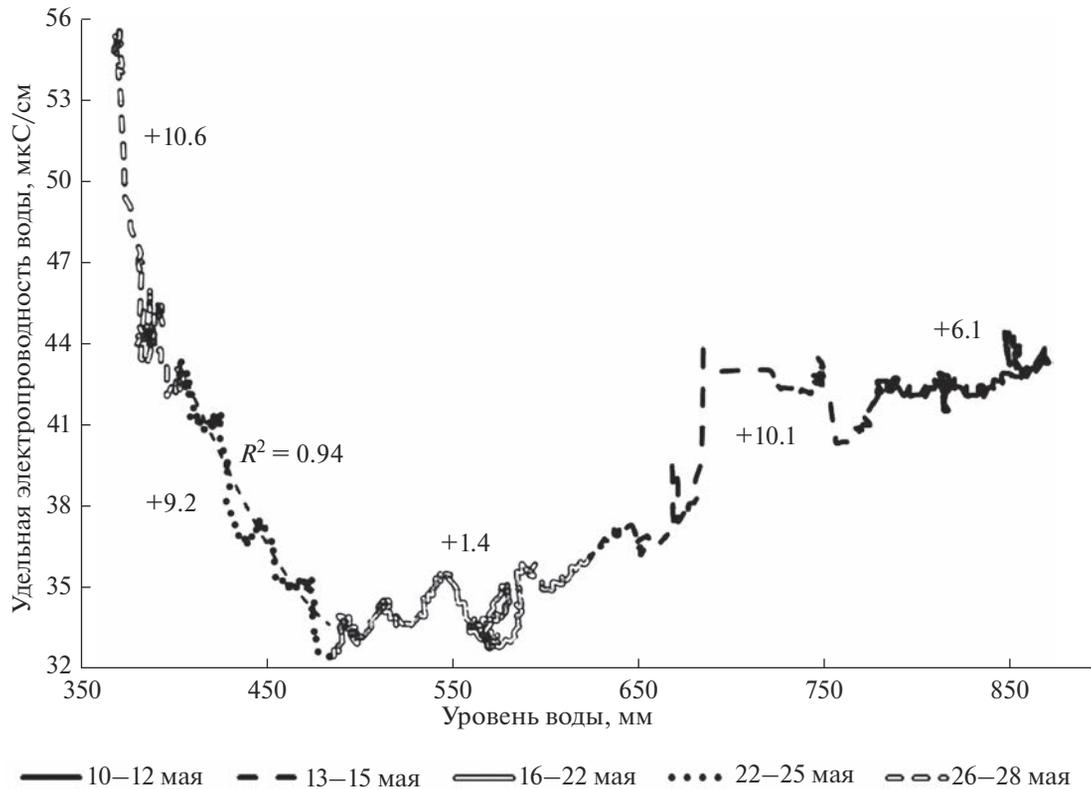


Рис. 6. Соотношение уровня воды и удельной электропроводности воды, р. Шестаковка – пост Верхний, 10–28 мая 2017 г. На графике приведены значения температуры воздуха, осредненные по времени (°C) для указанных диапазонов дат.

рования стока и комплексования источников питания малых перемерзающих рек криолитозоны, отражая в целом прямо и обратно пропорциональную и индифферентную связь между РВ и водностью потока. В первом случае преобладает режим вымывания (выщелачивания) РВ, во втором – режим их разбавления, в третьем – так называемый режим хемостаза, при котором разнонаправленные процессы уравниваются.

Связи $C-Q$ осложняются их нелинейностью и неоднозначностью в зависимости от фазы водного режима, что указывает на изменения во времени сочетания доминирующих источников питания реки при условии устойчивой контрастности содержания в них тех или иных РВ. Такую неоднозначность принято называть гистерезисом. В соотношении $C-Q$ петля гистерезиса, траектория которой закручена против часовой стрелки, может отражать общее преобладание вымывания РВ над их разбавлением на спаде половодья. Петля, ориентированная по часовой стрелке, в свою очередь указывает на интенсивное вымывание РВ в начале подъема водности (активизация источников РВ) и на преимущественное разбавление речной воды на спаде половодья более пресной водой. В ходе переменного преобладания процессов выщелачивания и разбавления на фоне дина-

мики стока в соотношении $C-Q$ может образоваться двойная петля с пересечением (иногда неоднократно) ветвей гистерезиса.

Автоматическая регистрация УВ, Т и УЭ воды с высоким временным разрешением (десятки минут) позволяет выявить зависимости стока от динамичных температурных условий его формирования, различать периоды с однотипными тесными и близкими по характеру связями между данными характеристиками, а также определить моменты и условия смены таких связей.

Авторы выражают признательность Б.И. Гарцману (ИВП РАН), В.В. Огонерову, Н.Е. Баишеву, Н.В. Торговкину, Л.Ю. Бойцовой, О.В. Шепелёвой, Н.И. Тананаеву, А.Б. Колесникову (ИМЗ СО РАН) за участие в сборе и обработке данных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Гео, 2014. 189 с.
2. Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. С. 44–55.

3. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре “Чабыда” (Центральная Якутия) // Наука и образование. 2017. № 2. С. 34–40.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса в бассейне р. Лены в связи с возможным изменением климата // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С. 476–487.
5. Иванов А.В. Криогенная метаморфизация состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск: Дальнаука, 1998. 164 с.
6. Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4 (155). С. 29–32.
7. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные субэдральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 1. С. 40–50.
8. Перельман А.Н., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей, 2000. 762 с.
9. Славинская Г.В., Селеменев В.Ф. Фульвокислоты природных вод. Воронеж: Воронежский ун-т, 2001. 165 с.
10. Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Ефремов В.С., Крыленко И.В., Сурков В.В., Шамов В.В., Луценко Т.Н. Условия и процессы формирования четковидного русла малой реки криолитозоны (на примере р. Шестакова, центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 2. С. 38–49.
11. Филиппов В.Е., Васильев И.С. Перигляциальный рельеф Лено-Вилюйского междуречья // География и природ. ресурсы. 2006. № 4. С. 82–86.
12. Шенелёв В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2011. 169 с.
13. Bierzoza M., Heathwaite A. Seasonal variations in phosphorus concentration-discharge hysteresis inferred from high-frequency in situ monitoring // J. Hydrol. 2015. V. 524. P. 333–347. 2015
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.036>
14. Bring A., Shiklomanov A., Lammers R.B. Pan-Arctic river discharge: Prioritizing monitoring of future climate change hot spots // Earth’s Future. 2017. V. 5. P. 72–92.
<https://doi.org/10.1002/2016EF000434>
15. Brown K.A., Williams W.J., Carmack E.C., Fiske G., François R., McLennan D., Peucker-Ehrenbrink B. Geochemistry of small Canadian Arctic Rivers with diverse geological and hydrological settings // J. Geophys. Res.:iogeosci. 2020. V. 125. e2019JG005414.
<https://doi.org/10.1029/2019JG005414>
16. Cartwright I., Morgenstern U., Hofmann H. Concentration versus streamflow trends of major ions and tritium in headwater streams as indicators of changing water stores // Hydrol. Process. 2020. V. 34. P. 485–505.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13600>
17. Clow D.W., Drever J. Weathering rates as a function of flow through an alpine soil // Chem. Geol. 1996. V. 132. P. 131–141.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00048-4)
18. Creed I.F., McKnight D.M., Pellerin B.A., Green M.B., Bergamaschi B.A., Aiken G.R., Burns D.A., Findlay S.E.G., Shanley J.B., Striegl R.G., Aulenbach B.T., Clow D.W., Laudon H., McGlynn B.L., McGuire K.J., Smith R.A., Stackpole S.M. The river as a chemostat: fresh perspectives on dissolved organic matter flowing down the river continuum // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2015. V. 72. P. 1272–1285.
<https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0400>
19. Fabre C., Sauvage S., Noël G.E., Teisserenc R., Probst J.L., Pérez J.M.S., Tananaev N. Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic ocean: the case of the Yenisei river basin // Water Res. 2019. V. 158. P. 118–135.
20. Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of the largest Siberian rivers // Polarforschung. 2017. V. 87. № 2. P. 167–176.
21. Godsey S.E., Kirchner J.W., Clow D.W. Concentration–discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments // Hydrol. Process. 2009. V. 23. P. 1844–1864.
<https://doi.org/10.1002/hyp.7315>
22. Gonzalez-Nicolas A., Schwientek M., Sinsbeck M., Nowak W. Characterization of export regimes in concentration–discharge plots via an advanced time-series model and event-based sampling strategies // Water. 2021. V. 13(13). P. 1723.
<https://doi.org/10.3390/w13131723>
23. Grimaldi C., Grimaldi M., Millet A., Bariac T., Boulègue J. Behaviour of chemical solutes during a storm in a rainforested headwater catchment // Hydrol. Process. 2004. V. 18. P. 93–106.
<https://doi.org/10.1002/hyp.1314>
24. Hirst C., Andersson P.S., Kooijman E., Schmitt M., Kutscher L., Maximov T., Morth C.-M., Porcelli D. Iron isotopes reveal the sources of Fe-bearing particles and colloids in the Lena River basin // Geochim. Cosmochim. Acta. 2020. V. 269. P. 678–692.
25. Keller K., Blum J.D., Kling G.W. Stream geochemistry as an indicator of increasing permafrost thaw depth in Antarctic watershed // Chem. Geol. 2010. V. 273. P. 76–81.
26. Knapp J.L.A., von Freyberg J., Studer B., Kiewiet L., Kirchner J.W. Concentration-discharge relationships vary among hydrological events, reflecting differences in event characteristics // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. V. 24. P. 2561–2576.
<https://doi.org/10.5194/hess-24-2561-2020>
27. Lloyd C., Freer J., Johnes P., Coxon G., Collins A. Discharge and nutrient uncertainty: implications for nutrient flux estimation in small streams // Hydrol. Process.

2016. V. 30. P. 135–152.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10574>
28. *Rice J.A., MacCarthy P.* Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances // *Org. Geochem.* 1991. V. 17 (5). P. 635–648.
29. *Rode M., Wade A.J., Cohen M.J., Hensley R.T., Bowes M.J., Kirchner J.W., Arhonditsis G.B., Jordan P., Kronvang B., Halliday S.J., Skeffington R.A., Rozemeijer J.C., Aubert A.H., Rinke K., Jomaa S.* Sensors in the stream: the high-frequency wave of the present // *Environ. Sci. Technol.* 2016. V. 50. P. 10297–10307.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02155>
30. *Shogren A.J., Zarnetske J.P., Abbott B.W., Ianucci F., Frei R.J., Griffin N.A., Bowden W.B.* Revealing biogeochemical signatures of Arctic landscapes with river chemistry // *Nature. Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 12894.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-49296-6>
31. *Stuefer S.L., Arp C.D., Kane D.L., Liljedahl A.K.* Recent extreme runoff observations from coastal arctic watersheds in Alaska // *Water Res. Res.* 2017. V. 53. P. 9145–9163.
<https://doi.org/10.1002/2017WR020567>
32. *Tsyplenkov A., Vanmaercke M., Golosov V., Chalov S.* Suspended sediment budget and intra-event sediment dynamics of a small glaciated mountainous catchment in the Northern Caucasus // *J. Soils Sediments.* 2020. 16 p.
<https://doi.org/10.1007/s11368-020-02633-z>
33. *Wild B., Andersson A., Bröder L., Vonk J., Hugelius G., McClelland J.W., Song W., Raymond P.A., Gustafsson Ö.* Rivers across the Siberian Arctic unearth the patterns of carbon release from thawing permafrost // *PNAS.* 2019. V. 116 (21). P. 10280–10285.
34. *Zhi W., Li L., Dong W., Brown W., Kaye J., Steefel C., Williams K.H.* Distinct source water chemistry shapes contrasting concentration-discharge patterns // *Water Resour. Res.* 2019. V. 55. P. 4233–4251.
<https://doi.org/10.1029/2018WR024257>