

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ  
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.51:551.34+911.9(571.651)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ИСТОЧНИКОВ  
ПИТАНИЯ И ВОДНОГО РЕЖИМА РЕКИ УГОЛЬНАЯ-ДИОНИСИЯ  
(АНАДЫРСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ, ЧУКОТКА)<sup>1</sup>

© 2021 г. О. Д. Трегубов<sup>a</sup>, Б. И. Гарцман<sup>b, e, \*</sup>, А. М. Тарбеева<sup>c</sup>,  
Л. С. Лебедева<sup>d</sup>, В. В. Шепелев<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт  
им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, 685000 Россия

<sup>b</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>c</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, 119991 Россия

<sup>d</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 677010 Россия

<sup>e</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия

\*e-mail: gartsman@inbox.ru

Поступила в редакцию 04.04.2020 г.

После доработки 29.07.2020 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

Впервые путем анализа пространственных вариаций и суточной динамики водного режима малой реки Анадырской низменности изучены основные источники и оценена динамика питания речного стока. В среднем и нижнем течении рек стабильность водного режима обеспечивают талые воды сезонных льдов, в горных истоках рек — конденсационные воды. Запасы надмерзлотных вод от протаивания верхнего 30-сантиметрового слоя меняются в низменных тундрах в пределах 80–220 мм. Вклад талых вод от сезонных льдов деятельного слоя в сток рек в начале теплого периода года составляет  $\geq 60\%$  общего стока. Водный режим тундровых рек в этот период отличают суточные циклы, в которых уровень воды и температура находятся в противофазе. Модуль стока конденсационных вод в истоках реки с водосбора, сложенного обломочным грунтом, в июле–августе меняется в пределах 15–50 л/км<sup>2</sup>с. Для конденсационных вод характерны суточные синфазные колебания уровня и температуры воды в ручьях при амплитуде температуры атмосферного и внутригрунтового воздуха 16°C. Летние осадки определяют режим стока тундровых рек при их обильном выпадении (30–60 мм) и полном насыщении влагой деятельного слоя в августе–сентябре. В июне осадки до 14 мм полностью расходуются на испарение и вегетацию растений и не оказывают влияния на сток рек.

*Ключевые слова:* криолитозона, сезонноталый слой, надмерзлотные воды, источники питания рек, водный режим.

DOI: 10.31857/S0321059621040180

## ВВЕДЕНИЕ

Наименее изученные в России по условиям питания и режиму стока — бассейны рек крайнего северо-востока Евразии. Удаленность и труднодоступность, суровые климатические условия и безлюдность ограничивают возможность создания здесь регулярной сети гидрологических постов и проведения режимных наблюдений за стоком рек. Исследования последних лет большей частью опираются на данные наблюдений немногочисленных постов на крупных реках, для которых имеются многолетние ряды наблюдений. Для

небольших водосборов широко используются методы подобия, когда режимные характеристики бассейнов-аналогов с большой долей условности экстраполируются на бассейны со сходными ландшафтными и климатическими условиями. При этом важные геофизиологические, ландшафтные, региональные климатические особенности речных бассейнов зачастую игнорируются, а получаемые сведения имеют ориентировочный характер.

К числу таких малоизученных водных бассейнов относятся реки Чукотки — территории, относящейся к Арктической зоне Российской Федерации, для которой прикладные гидрологические исследования в последние годы особенно актуальны. Для большинства населенных пунктов и

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-05-60036, 19-05-00353 и 20-55-53014), совместно РФФИ и ГФЕН Китая (проект 20-55-53014).

промышленных производств поверхностные воды — единственный приемлемый источник водоснабжения [14]. Специфика исследуемой проблемы — мерзлотно-климатические условия бассейнов малых рек приморских низменностей криолитозоны. Здесь на питание и сток рек оказывают влияние морской субарктический или арктический климат, мелкий тип сезонного протаивания и минерализованные подмерзлотные подземные воды.

Возникает вопрос: как в короткий срок получить максимум информации о водном режиме таких рек? Очевидно, для этого необходимы новые подходы, применение современных средств наблюдений, сочетание методов разных направлений наук, связанных с изучением условий питания и климата рек криолитозоны. Настоящая статья посвящена анализу закономерностей питания и режима стока малых рек Анадырской низменности Чукотки на основе краткосрочных комплексных натурных исследований в бассейне р. Угольная-Дионисия, выполненных в теплый период 2019 г.

## ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

История изучения гидрологии рек Арктической зоны России достаточно полно освещена в статье [12]. По водному режиму северные реки отнесены к западносибирскому и восточносибирскому типам с преимущественно снеговым питанием, весенне-летним половодьем, устойчивой зимней и переменчивой летней меженью [16]. Ряд работ акцентирует внимание на довольно частую повторяемость в многолетних рядах наблюдений на Северо-Востоке летне-осенних паводков, что позволяет отнести некоторые речные бассейны Камчатки, Чукотки и Охотского побережья к дальневосточному типу [12].

Исследователи ландшафтов и речных бассейнов криолитозоны обращают внимание на роль мерзлотных факторов в формировании режима водотоков и водоемов [11, 19, 22]. В условиях криолитозоны классификация подземных источников питания речного стока усложняется особыми категориями вод — надмерзлотными водами сезонноталого слоя и таликовых зон, межмерзлотными и подмерзлотными водами [17, 18].

Интересны выводы о роли сезонноталого слоя в питании малых рек [4] и о снижении надмерзлотного стока с увеличением глубины сезонного протаивания [20, 21]. Отмечается участие надмерзлотной “черной воды” в питании рек равнин криолитозоны в июне и в первые месяцы зимы [18]. Однако количественных оценок поступления в водотоки талых вод подземных сезонных льдов не проводилось. Ранее авторами статьи обращалось внимание на существенную роль сезон-

ных льдов деятельного слоя в летнем питании малых рек низменностей криолитозоны [13].

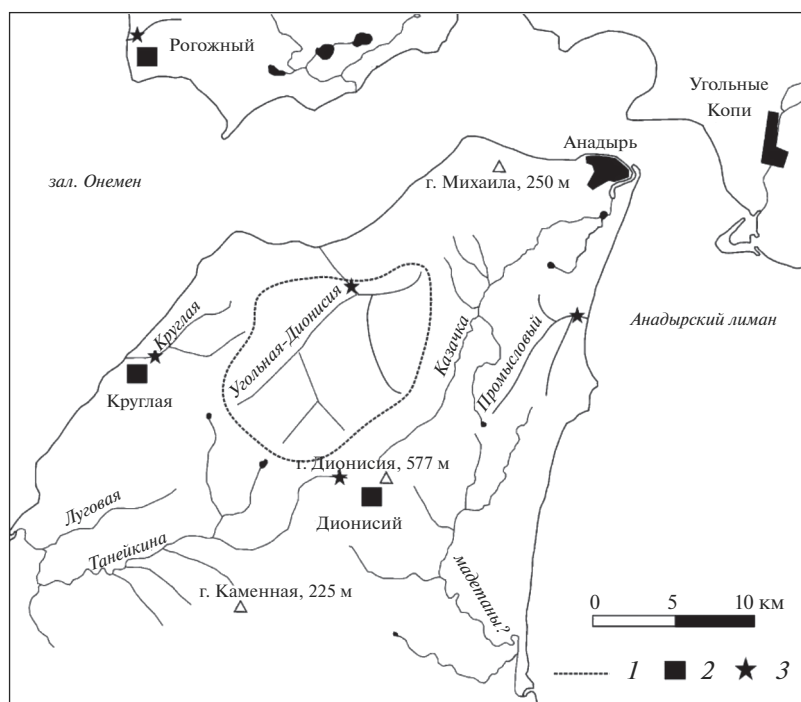
Количественные оценки конденсации водяных паров в деятельном слое и питания рек конденсационными водами многочисленны, но зачастую имеют общий характер и во многом противоречивы [2, 3, 8, 18]. В целом признана сложность нелинейных связей между флуктуациями климата, динамикой сезонноталого слоя и режимом поверхностных вод [23].

Эта совокупность данных предопределила выбор подходов и методов настоящего исследования. Проведены комплексные наблюдения за водным режимом малой реки с максимальным ландшафтно-мерзлотным разнообразием водосборной площади в период максимальной скорости протаивания льдистых горизонтов деятельного слоя. При этом синхронно фиксировались температура и уровни надмерзлотных вод, рек и ручьев, динамика сезонного протаивания и параметры образования конденсационных вод, минерализация и химический состав воды. Наблюдения выполнялись в бассейне р. Угольная-Дионисия, расположенном на границе Анадырской низменности, в период с 26 июня по 10 июля 2019 г. Дополнительные исследования проводились в конце теплого периода с 25 августа по 6 сентября 2019 г.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анадырская низменность (площадь 35 тыс. км<sup>2</sup>) расположена в Чукотском АО в пределах южных кустарниковых тундр в нижнем течении рек Анадыри, Великой, Канчалан. Климат территории субарктический морской, среднегодовая температура за период 1981–2010 гг. составила  $-5^{\circ}\text{C}$ . Количество осадков 380 мм в год, из них большая часть выпадает в зимний период. Мощность сплошной многолетней мерзлоты уменьшается с С на Ю с 300 до 50 м. Температура мерзлых грунтов на подошве слоя годового теплооборота меняется с С на Ю от  $-7.1$  до  $-1^{\circ}\text{C}$ . Глубина сезонного протаивания в ненарушенных условиях в типичных ландшафтах низменности — в пределах 45–55 см.

Объект исследования — р. Угольная-Дионисия, получившая название по выходам пластов угля в бортах нижнего ее течения и по горе Дионисия, в северо-западных отрогах которой берет начало правый исток. Площадь водосбора составляет 96 км<sup>2</sup>. Протяженность реки 24 км. Отметки высоты уреза воды меняются от 100 и 180 м в истоках до 2.5 м в устье на правом берегу Анадырского лимана. Ширина меандрирующего в нижнем течении русла до 14 м, глубина бродовых переправ до 0.6 м. Долина реки V-образная с крутым, иногда обрывистым в среднем течении



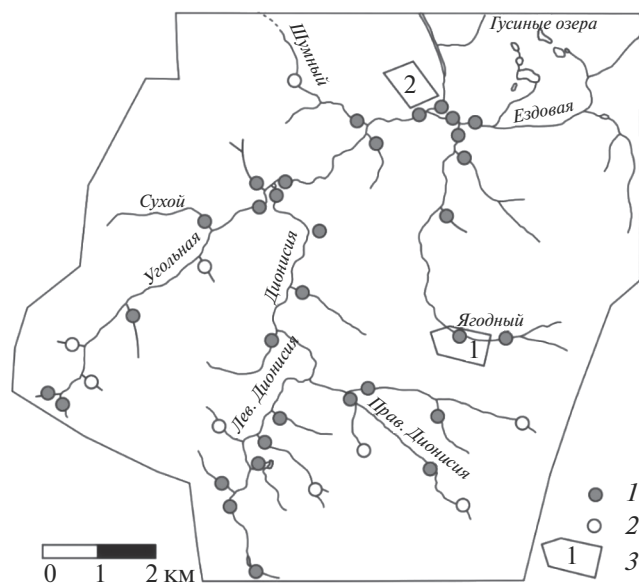
**Рис. 1.** Картограмма территории расположения объектов исследования: граница водосбора р. Угольная-Дионисия (1), площадки CALM (2), замыкающие створы (3).

левым бортом. Ширина поймы в верхнем течении 20–30, в нижнем до 60 м. Надпойменная терраса фрагментарна. По периметру водосборной площади расположены сопки (Острая, Большая и Малая, Круглая) с отметками высот 250–150 м. В пределах водосбора выделяются уплощенные вершины, обширные и протяженные склоны длиной от 2 до 7 км и уклоном от 0.75 до 3.5°. Выбор р. Угольной-Дионисия в качестве основного объекта исследований обусловлен положением ее водосбора на границе низменных и горных тундр, что позволяет использовать сравнительный анализ при изучении различных условий питания. Опорный створ находится в 6 км от устья вне зоны приливного влияния Анадырского лимана, замыкая исследованную водосборную площадь величиной 89.4 км<sup>2</sup>. В качестве дополнительных объектов привлекались данные по площадкам CALM, р. Круглой, руч. Промысловому, двум ландшафтными профилям в окрестностях г. Анадыря (рис. 1).

В основе методологии исследований – сравнительный пространственный и временной анализ комплекса признаков и показателей разнообразия ландшафтно-мерзлотных условий водосборной площади и стока водотоков различных порядков. Пространственный сравнительный анализ заключался в изучении распределения по площади бассейна величины модуля стока и условий его питания во взаимосвязи с ландшафт-

ным строением территории. Временная динамика анализировалась путем изучения суточных колебаний температуры и влажности деятельного слоя, уровней и расходов воды в реке. На рис. 2 представлена крупномасштабная схема расположения пунктов измерений в бассейне р. Угольная-Дионисия. Следует отметить, что в статье под суточной или сезонной динамикой параметров понимаются их закономерные изменения в течение нескольких дней или месяцев, измеренные, соответственно, с периодичностью 0.5–1 ч и 10–30 сут.

Мерзлотно-гидрометрическая съемка территории масштаба 1 : 50000 включала в себя наблюдения криогенных процессов и описания почвенно-растительного покрова, измерения влажности деятельного слоя и глубины сезонного протаивания, определения гидрохимических показателей и расходов водотоков 1–3 порядков. На ключевых участках проводились измерения параметров стока в контрольных створах реки, непрерывные наблюдения уровней и температуры воды в контролируемых надмерзлотный сток шурфах и руслах водотоков, температуры и влажности различных горизонтов почвы. Интервал замеров – 30 мин. Полевая метеостанция синхронно фиксировала температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, осадки. В первой декаде июня до начала протаивания почв на двух эталонных ландшафтных профилях в окрестностях г. Анадыря из



**Рис. 2.** Расположение контрольных створов измерения расхода воды притоков р. Угольная-Дионисия и опытных площадок изучения надмерзлотного склонового стока: 1 – русловой сток измерен, 2 – русловой сток отсутствует, 3 – опытные площадки.

деятельного слоя в десяти точках отбирались пробы керн, в которых термостатно-весовым способом определялась льдистость с интервалом 5 см до глубины 45–50 см.

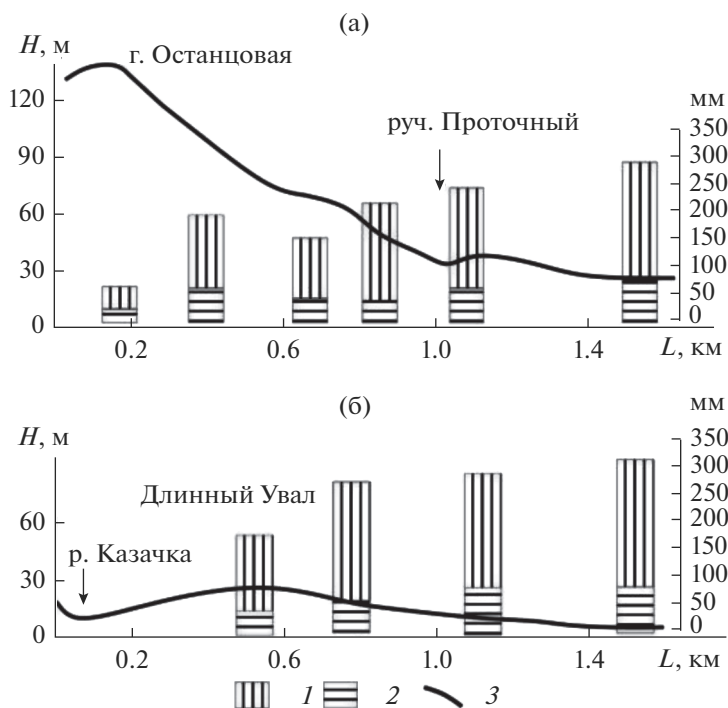
Среднесуточная температура в период полевых работ составила 12.1°C, влажность воздуха 84.3%. Сплошной снежный покров в бассейне реки, как и в Анадырской низменности в целом, сошел за 2 нед. до начала наблюдений. После схода снежного покрова до начал работ выпало 2.2 мм осадков, за 14 дней экспедиции – 13 мм. Средняя

температура воздуха за 4 мес. теплого периода 2019 г. составила 10.1°C. При этом выпало 95.6 мм осадков [15]. Метеорологические условия в 2019 г., по данным наблюдений на метеостанции Анадырь и полевой метеостанции (табл. 1), в целом близки к норме. Гидрологические условия в регионе в этом году, по данным наблюдений на ближайших гидрологических постах р. Майн – с. Ваеги и р. Анадырь – с. Усть-Белая, также близки к норме, превышения критических паводковых уровней не наблюдалось.

При проведении измерений использовались приборы и оборудование: вертушки “ПОТОК-мкр ГР-100” и “Поток ГР21М”; влагомеры “ТК100-01”; портативные кондуктометр “СОМ-80” и рН-метр “KL-911”; автоматические логгеры производства “НОВО ONSET” – измерители уровней “U20L-04”, температуры “U23-003” и влажности почв “U23-002”; металлический щуп 5 × 1200 мм и труба для отбора керн 32 × 1000 мм. Первичная обработка данных проводилась согласно рекомендациям производителей приборов. В числе использованных в работе расчетных показателей: льдистость деятельного слоя, модуль стока, минерализация поверхностных вод, смещение фаз суточных колебаний температуры и уровней воды. В обработке данных режимных наблюдений использовались инструменты “Microsoft Excel”, для составления пространственных схем применялся метод интерполяции “Kriging” программы “Golden Software Surfer”. Точки определений модуля стока, минерализации, льдистости выносились в центры соответствующих водосборов и ландшафтных выделов на топографической и ландшафтной картах в системе местных координат XY. При составлении матриц данных для интерполяции измеренные значения гидрометриче-

**Таблица 1.** Мерзлотно-климатическая характеристика района исследований по данным метеостанции Анадырь и наблюдений авторов в 2017–2019 гг.

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Среднегодовая температура, °С	–3.4	–4.9	–3.7
Среднелетняя температура, °С	10.6	10.2	11.4
Среднезимняя температура, °С	–16.9	–19.1	–15.6
Количество жидких осадков, мм	106.1	139.1	91.6
Количество твердых осадков, мм	210.8	256.5	268.0
Средняя глубина сезонного протаивания, см			
в горном подножье	59.9	54.1	60.6
на вершине увала	55.0	51.4	59.9
в озерно-болотной котловине	49.0	46.0	49.7



**Рис. 3.** Изменение льдистости деятельного слоя (мм водного слоя) для интервалов глубин 0–30 см (1) и 30–45 см (2) на типичных гипсометрических профилях района (3) в 2019 г.

ских характеристик были приведены к состоянию на 1 июля 2019 г. по расходу в опорном створе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

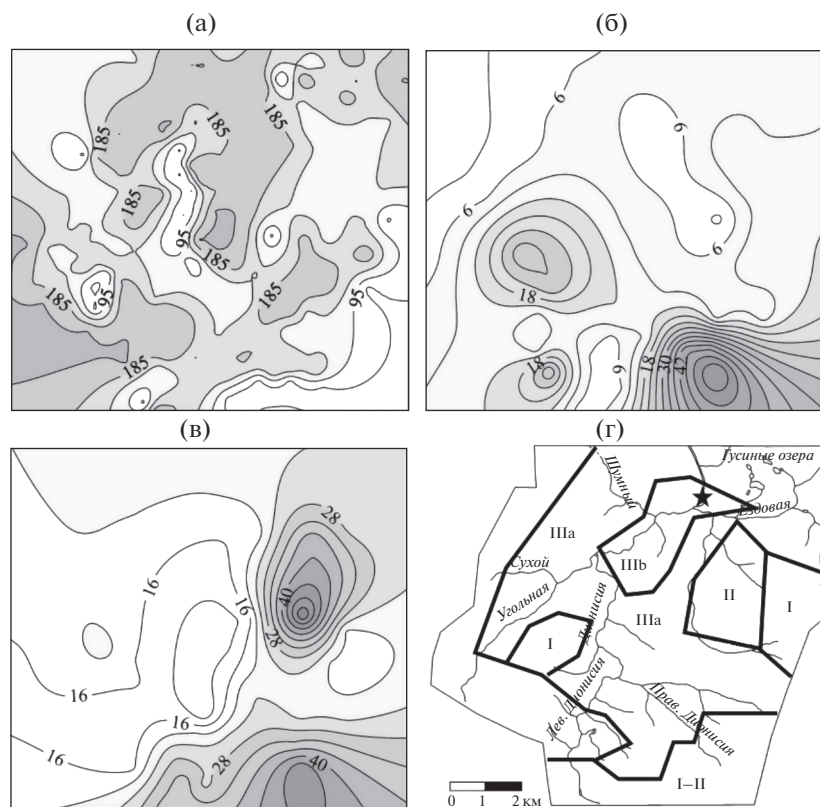
Экспедиции предшествовали круглогодичные автоматизированные наблюдения за температурой сезонноталого слоя, ежегодные измерения глубины протаивания, влажности и льдистости деятельного слоя [15]. Данные многолетних измерений с интервалом 4 ч на глубинах 15, 20, 30 и 40 см позволили предварительно оценить ожидаемое время и скорость сезонного протаивания почв в течение 2019 г. Для типичных для района исследований кочкарных мохово-пушицевых тундр пологих склонов ожидалось соответственно следующие глубины и скорости протаивания: на 12.06.2019 – 2 см и 0.45 см/сут, на 26.06.2019 – 10 и 1.1, на 10.07.2019 – 30 и 0.8, на 17.07.2019 – 40 и 0.9, на 14.08.2019 – 50 см и 0.42 см/сут. Впоследствии эти расчеты подтвердились. В период мерзлотно-гидрометрической съемки 3–9 июля 2019 г. глубина протаивания менялась в пределах 20–30 см в зависимости от почвенно-растительного покрова.

В ходе мерзлотно-гидрометрической съемки по данным более 800 измерений глубины протаивания и влажности почв установлен мозаичный характер распределения этих параметров в точках наблюдений на начало июля в соответствии со

структурой растительного покрова тундр и болот. Глубина протаивания на начало июля в западинах под моховым покровом была  $\leq 25$  см, под травянистой и кустарничковой растительностью кочек и бугров увеличивалась до 30–35 см. Исключение – горно-тундровые ландшафты верховьев, где измерения щупами затруднены, а мощность деятельного слоя достигает 1.0–1.5 м. Аналогичная мозаичная структура выявлена для влажности почв, измеренной на глубине 20–30 см. Поэтому эти параметры не использовались для пространственной интерполяции.

Измеренная весной 2018 и 2019 гг. объемная льдистость почв и грунтов деятельного слоя в органогенных горизонтах до глубины 30 см достигала 80–96%. Снижение льдистости с 50 до 25% наблюдалось в интервале глубин 30–40 см и до 20% в обломочных грунтах на крутых склонах. Далее с глубиной льдистость вновь повышалась на фронте сезонного протаивания 40–50 см до 65%. В отличие от глубины протаивания, льдистость почв и грунтов деятельного слоя на начало июля показала закономерную пространственную изменчивость, обусловленную как характером почвенно-растительного покрова, так и геоморфологическими параметрами водосборов (рис. 3).

По результатам опробования почв деятельного слоя максимальная по профилям льдистость, пересчитанная в высоту водяного слоя на заболоченных участках протяженных (>1000 м) склонов,



**Рис. 4.** Пространственная структура условий питания р. Угольная-Дионисия по состоянию на 01.07.2019: а – запас талых вод сезонных льдов, мм, до глубины 30 см (рис. 2); б – модуль стока, л/км<sup>2</sup> с; в – минерализация поверхностных вод, мг/л; г – районирование по преобладающему источнику питания (I – конденсационные воды, II – подземные воды, IIIа – надмерзлотные талые воды тундр, IIIб – надмерзлотные воды тундроболот); звезда – местоположение замыкающего створа.

составила 250–300 мм. Наименьшая льдистость (50–150 мм) определена для коротких (<500 м) и крутых склонов и террас с промывным режимом и кустарничковой мохово-лишайниковой растительностью. Таким образом, ландшафты района исследований содержат достаточные запасы воды в сезонных льдах для рассмотрения надмерзлотных вод в качестве значимого источника питания рек в период активного протаивания деятельного слоя. Данные прямых определений льдистости в керне мелких скважин использованы для пространственного анализа запасов талых вод сезонных льдов, протаявших к 10 июля, методом интерполяции (рис. 4а).

Основным результатом гидрометрической съемки (с отбором проб воды) стали схемы модуля стока и минерализации вод ручьев порядков 1–3 в изолиниях. По величине модуля (л/км<sup>2</sup> с) стока можно обоснованно разделить бассейн: на горную область истоков (>15), тундровую увалистую область (6–12), равнинную область верховых и низинных болот (≤6) (рис. 4б).

Величины минерализации поверхностных вод позволили выделить участки с потенциальным

питанием межмерзлотными и подмерзлотными минерализованными водами (рис. 4в). Выходы подземных вод с минерализацией >3 г/л, обнаруженные в ходе маршрутов, в матрицу данных не включались. В отобранных пробах после смешения подземных подмерзлотных и поверхностных вод минерализация превышала фоновые значения в 3–3.5 раза.

По результатам пространственного анализа, описанного выше, в пределах водосбора реки выделены 3 области с различным весом потенциальных источников питания (рис. 4г). Обособленная область I относится к горным тундровым ландшафтам. Здесь, по мнению авторов, в питании рек основная роль принадлежит конденсационным водам, талым водам снежников и атмосферным осадкам. Источники питания области II – это подземные подмерзлотные и надмерзлотные талые воды сезонных льдов деятельного слоя, атмосферные осадки. Каркас территории водосбора образует область III с питанием надмерзлотными талыми водами сезонных льдов, стоком талых снеговых вод и атмосферных осадков, депонированных проточными озерами и шнуровыми болотами. Подобласть IIIб отличается более замед-

ленным стоком, связанным с влиянием верховых и низинных болот, пологосклонным рельефом. По данным полевых наблюдений, низинные болота и пологие склоны по берегам реки отличаются наличием маломощных, но многочисленных снежников с глубиной протаивания по их периферии <10 см. Это объясняет как уменьшение здесь модуля стока, так и низкую минерализацию поверхностных вод (рис. 4б, 4в).

При выявлении источников питания речного стока, характерных для выделенных областей, наиболее сложна оценка роли талых вод сезонных льдов. Вывод об их существенном вкладе подтверждают режимные наблюдения за суточными колебаниями температуры и уровней воды. Классические модели изменений температуры верхних слоев деятельного слоя основываются на представлениях о теплообороте, когда максимальная температура на дневной поверхности в ходе теплообмена достигает каждой конкретной глубины через определенное время [6, 24]. При этом с глубиной в почвах уменьшаются амплитуда суточных колебаний и мощность теплового потока. По данным выполненных в июле измерений, моменты наступления максимума в суточных колебаниях температуры почвы на разных глубинах деятельного слоя смещены от момента максимума температуры на поверхности почвы следующим образом: на глубине 10 см – на 3.5 ч, 20 см – на 8.3 ч, 30 см – на 10.6 ч, 40 см (мерзлое состояние) – на 13.1 ч (рис. 5). Таким образом, в июле суточный максимум теплового потока достигал фронта протаивания через 8–13 ч.

Уровни воды в шурфах на тундровых склонах поднимались ранним утром следующего дня через 14.8 ч, а в водотоках 2-го порядка – через 15.9 ч после максимума дневной температуры прошедших суток (рис. 6). Следовательно, разница между моментом наступления максимума температуры почвы на фронте протаивания и моментом максимумов уровней первичных водотоков составляет 2–3 ч, что связано с продолжительностью фильтрации и добегаания воды. На замыкающем створе р. Угольная-Дионисия повышенный уровень воды в рамках суточного цикла наблюдался с вечера в 19:00–21:00 до утра в 04:30–07:00. Кратковременный спад воды в реке приходился на полдень, в шурфах – на вторую половину дня. Температура воды в депонирующих надмерзлотный сток шурфах находится в противофазе с уровнем воды: максимум уровня воды соответствует наименьшей ее температуре (рис. 6б).

В ручьях минимумы температуры приходятся на начало подъема уровня воды, а в реке – на начало его спада. Подобное явление наблюдается в горах с ледниковым питанием, когда уровень воды в верховьях рек и приледниковых озерах повышается, а температура воды синхронно снижа-

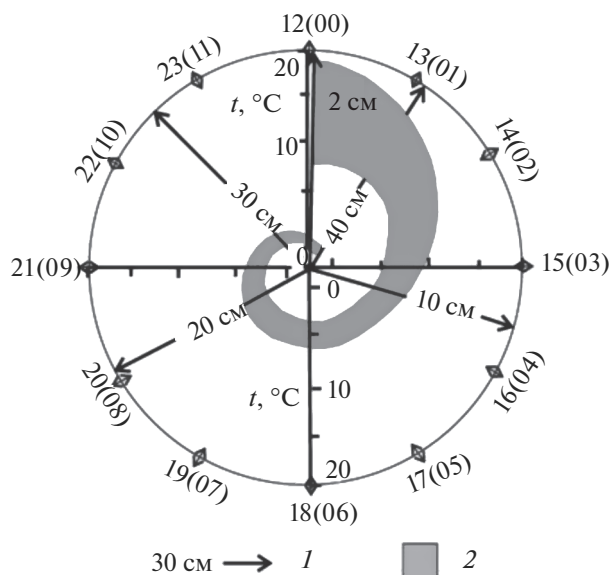
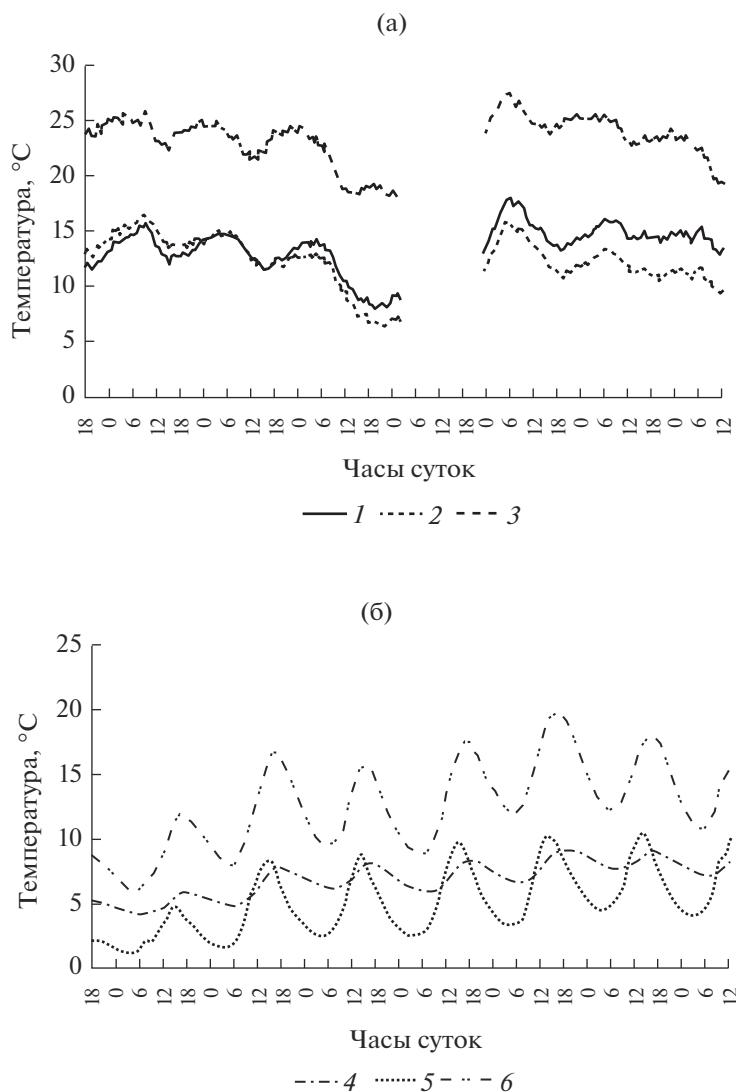


Рис. 5. Модель суточного теплооборота деятельного слоя: 1 – время достижения суточного максимума температуры на различной глубине, 2 – изменение амплитуды суточных колебаний температуры с глубиной в интервале 2–40 см.

ется во второй половине дня [9]. Колебания уровня воды в ручьях в период наблюдений составили 2–5 см, скорости течения – 15–20%. Однако следует понимать, что таяние сезонного льда и надмерзлотный сток происходят непрерывно в течение суток.

В период режимных наблюдений в р. Угольная-Дионисия наблюдалось резкое падение расхода на замыкающем створе с 1.5 м³/с 27.06.2019 до 0.16 м³/с 06.07.2019. По мнению авторов статьи, это стало результатом полного вытаивания сезонных льдов верхних горизонтов почв на большей части водосбора и отсутствия других, сопоставимых по объему стока источников питания. Данный вывод подтвердили предварительные результаты гидрохимического расчленения стока по источникам питания. В рассматриваемый период на фоне резкого уменьшения стока прослеживается снижение доли надмерзлотных вод деятельного слоя в общем стоке, которое не могло быть компенсировано питанием глубокими подмерзлотными водами, талыми водами снежников или конденсационными водами.

Другой проблемный источник питания реки с суточными колебаниями – конденсационные воды [7]. Существующие оценки конденсации в деятельном слое варьируют от 10 до 100 мм за теплый период года [8, 18]. Измерения влажности торфянистых тундровых почв на ключевом участке показали отсутствие в июле суточных колебаний. Влажность на глубинах 20–30 см достаточно



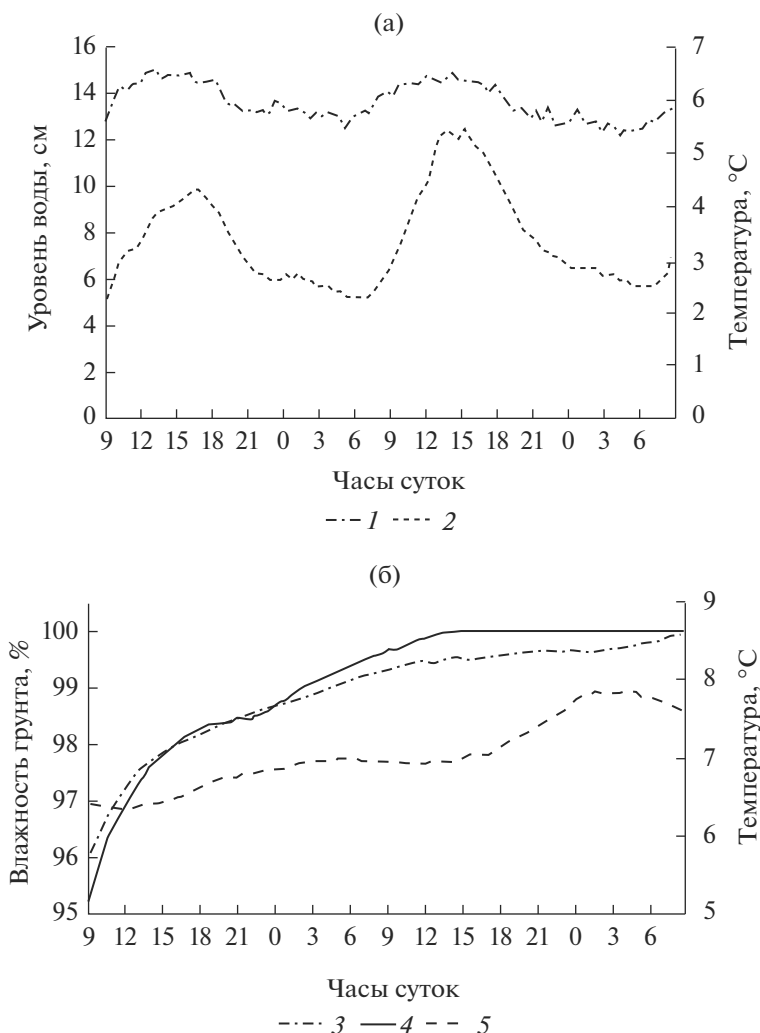
**Рис. 6.** Суточная динамика уровня воды (а): 30-сантиметрового деятельного слоя (1), в руч. Ягодном (2), в р. Угольная-Дионисия (3). Суточная динамика температуры воды (б): 30-сантиметрового деятельного слоя (4), в руч. Ягодном (5), в р. Угольная-Дионисия (6).

плавно повышалась в понижениях рельефа или снижалась на возвышенностях, что, по-видимому, связано с изменением положения зеркала надмерзлотных вод.

Специальные исследования условий образования конденсационных вод проведены в последней декаде августа при максимальной глубине протаивания, в отсутствие осадков и снежников в истоках ручья с площадью водосбора 0.6 км<sup>2</sup> и отметками высот от контрольного створа до истока 215–540 м. На схеме районирования бассейна здесь выделена область I–II с модулем стока 15–50 л/км<sup>2</sup> с (рис. 4г). Горный распадок с осыпными склонами и пятнистыми щебнистыми кустарничковыми мохово-лишайниковыми тундрами априори считался благоприятным для наблюде-

ний образования конденсационных вод ввиду многолетнего стабильного летнего стока этого ручья в отсутствие других источников питания. Измерения расхода в ручье в створе со скальными выходами магматических пород в бортах и русле показали модуль стока 40 л/км<sup>2</sup> с. Здесь же на несколько суток был установлен уровнемер, а на горных склонах водосбора в глыбово-щебнистых отложениях на глубине 30 см – датчики автоматического термометра и влагомера. Измерения показали контрастные синфазные суточные циклы уровня и температуры воды в ручье на фоне колебаний температуры грунта и слабых, но заметных суточных колебаний его влажности (рис. 7). Несмотря на малую продолжительность измерений, интерпретация явления представляется очевидной. Наибольшие уровень и температура воды в





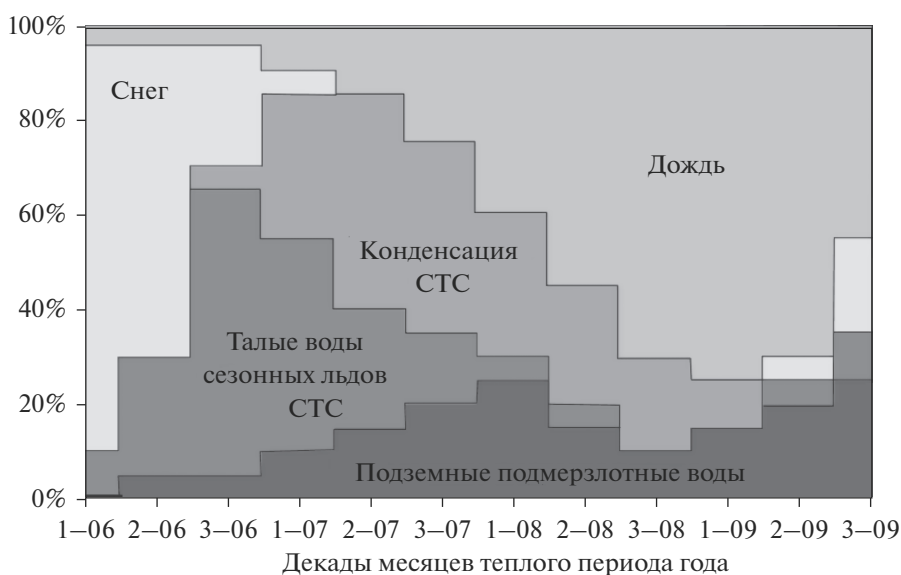
**Рис. 7.** Динамика суточных колебаний стока ручья (а) и параметров термовлажностного режима водосбора (б): 1 – уровень воды, 2 – температура воды, 3 – влажность в слое грунта на высоте 286 м, 4 – влажность в слое грунта на высоте 320 м, 5 – температура в слое грунта на высоте 286 м.

ручье приходится на 12–15 ч, когда температура обломочного грунта минимальна, а влажность повышается. Разница температуры внутригрунтового и атмосферного воздуха в этот момент достигала 16°C, что наиболее благоприятно для конденсации влаги [1, 7].

В сентябре с понижением среднесуточной температуры воздуха с 15 до 7.5°C и достижением сезонного максимума глубины протаивания условия образования конденсационных вод в горных истоках и талых надмерзлотных вод в тундровых водосборах существенно изменились. Наблюдения за режимом стока тундровых ручьев и уровнем надмерзлотных вод в шурфах у площадки CALM Рогожный (рис. 2) при модуле 6.6 л/км<sup>2</sup> с и глубине протаивания 50–55 см показали отсутствие суточных циклов уровня воды. Смещение фаз колебаний температуры воды относительно

полуденного максимума температуры воздуха составило 3.5 ч, что соответствует норме для водотоков и водоемов. Тогда же отмечена чувствительная реакция уровня воды в шурфах в деятельном слое на выпадение атмосферных осадков. В течение 5 сут наблюдений зафиксировано 2 дождливых дня, которые сопровождалось подъемом уровня воды на 2.5–5 мм в шурфах и на 1–2 мм в ручье. По данным метеостанции Анадырь, которая удалена от площадки на 26 км, в эти дни выпало 0.3 и 2 мм осадков.

Собранный материал, несмотря на фрагментарный характер и отсутствие непрерывных рядов гидрологических наблюдений, позволяет отметить ряд закономерностей и особенностей питания малых рек Анадырской низменности. Удастся это сделать в том числе и благодаря постановке полевых экспериментов, ориентированных на



**Рис. 8.** Модель разделения стока р. Угольная-Дионисия по источникам питания в теплый период 2019 г. (СТС – сезонно-талый слой).

выявление генетических признаков источников питания в различных ландшафтных и мерзлотных условиях.

Полученные результаты позволяют дополнить известную схему расчленения гидрографа с весенним половодьем периодами питания рек талыми водами сезонных льдов и конденсационными водами, а также уточнить время и причины летней межени. Явление замещения снеговых вод надмерзлотными на примере равнинных рек Якутии описал В.В. Шепелев [18], но оно не было заслуженно оценено и изучено как глобальное для криолитозоны. Вклад талых вод подземных льдов сезонно-мерзлого слоя был также отмечен на южных рубежах криолитозоны [5, 10]. На Анадырской низменности питание рек за счет таяния льдистых почв 30-сантиметрового верхнего слоя, так называемое “растянутое” половодье, приходится на вторую декаду июня – первую декаду июля (рис. 8).

Условия образования конденсационных вод – достаточная глубина протаивания деятельного слоя, сложенного обломочным материалом, и градиент температуры внутригрунтового и атмосферного воздуха  $\geq 10^\circ\text{C}$  [1]. Для бассейна Угольная-Дионисия такие благоприятные для конденсации условия сложились в 2019 г. в первой декаде июля и сохранялись по конец августа. В сентябре с понижением среднесуточной температуры воздуха до  $7^\circ\text{C}$  конденсация замедлилась и перестала играть значимую роль в питании рек. Возобновление надмерзлотного стока в конце сентября аппаратными измерениями не фиксировалось, но смоделировано с учетом известных данных о криогенном напоре в деятельном слое [18] и на-

турных наблюдений взлома первого ледостава ручьев и малых рек в начале зимнего периода.

Таким образом, территориально сопряженные речные бассейны с различным ландшафтным строением водосбора, глубиной протаивания и вещественным составом деятельного слоя будут иметь различное время завершения половодья, наступления летней и зимней межени.

## ВЫВОДЫ

Полученные результаты представляются существенным этапом в изучении условий питания и режима стока рек Анадырской низменности, позволяя при этом сделать некоторые предположения и наметить перспективные пути дальнейших исследований гидрологии рек криолитозоны.

Впервые путем анализа пространственных вариаций и временной (суточной и сезонной) динамики рассмотрены источники питания и режим стока малой речной системы приморской низменности криолитозоны. Использование подходов динамической реконструкции позволило в короткие сроки получить максимально полную информацию о закономерностях и особенностях формирования стока малой реки в периоды смены весенне-летнего половодья летней меженью и к концу теплого периода года.

С применением новых и традиционных методов гидрологии и геокриологии проведено районирование территории водосбора по доминирующим источникам питания стока в летнюю межень. Определены возможные факторы изменения условий питания р. Угольная-Дионисия на рубежах низменных и горных ландшафтов в течение

суток и месяцев теплого периода года. Применение почасового контроля температуры, уровня и скорости течения воды позволило выявить диагностические признаки различных источников питания рек криолитозоны, выдвинуть предположения о причинах и факторах “растянутого” половодья и переменчивой летней межени у различных водотоков.

Обоснована ведущая роль талых вод от сезонных льдов деятельного слоя в обеспечении стока с водосборов Анадырской низменности в июне—июле при протаивании деятельного слоя до глубины 30—35 см. Установлено, что уровенная поверхность надмерзлотных и речных вод в этот период колеблется в противофазе с их температурой. Обозначены условия и благоприятный временной период образования и стока конденсационных вод, установлены отличия их динамики от динамики надмерзлотных вод. Суточные колебания уровня, температуры конденсационных вод и влажности обломочного грунта водосбора синфазны, а значения температуры атмосферного и внутригрунтового воздуха находятся в противофазе.

Авторы выражают благодарность М.А. Нутевкет и К.К. Уяганскому (СВКНИИ ДВО РАН), Е.А. Шекману (ТИГ ДВО РАН), А. Уяганскому и В. Уяганскому за помощь при проведении полевых работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алишаев М.Г. О конденсации и осаждении атмосферной влаги в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 17—28.
2. Банцеккина Т.В. Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период (на примере Верхнеколымского нагорья). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2003. 23 с.
3. Банцеккина Т.В., Михайлов В.М. К оценке роли внутригрунтовой конденсации водяных паров в формировании теплового и водного режимов крупнообломочных склоновых отложений // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 1. С. 40—45.
4. Глотов В.Е. Перспективы водоснабжения за счет подземных вод в горных арктических районах северо-востока России // Изв. Самарского НЦ РАН. 2016. Т. 18. № 2. С. 326—330.
5. Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Василенко Н.Г. Источники формирования речного стока в зоне многолетней мерзлоты: оценка методами трассерной гидрологии по данным режимных гидрохимических наблюдений // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 1. С. 32—43.
6. Достовалов В.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во Московского ун-та, 1967. 403 с.
7. Дублянский В.Н., Дублянский Ю.В. Проблема конденсации в карстоведении и спелеологии // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: ПГНИУ, Ин-т карстоведения и спелеологии, 2001. С. 51—72.
8. Жирков А.Ф., Пермьяков П.П., Железняк М.Н. Влияние внутригрунтовой конденсации на термовлажный режим мерзлых грунтов // Проблемы региональной экологии. 2018. № 3. С. 77—89.
9. Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С. Колебания уровня воды в горных ледниковых озерах Приэльбрусья // Геориск. 2013. № 3. С. 20—27.
10. Кичигина Н.В., Губарева Т.С., Шамов В.В., Гарцман Б.И. Трассерные исследования формирования речного стока в бассейне озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2016. № 5. С. 60—69.
11. Лебедева Л.С. Формирование речного стока в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИГ РАН, 2018. 22 с.
12. Магрицкий Д.В., Повалишников Е.С., Фролова Н.Л. История изучения стока воды и водного режима рек Арктической зоны России в XX в. и начале XXI в. // Арктика и Антарктика. 2019. № 3. С. 61—96.
13. Нутевкет М.А., Трегубов О.Д., Уяганский К.К. Водный баланс криолитозоны: компенсирующая роль сезонного протаивания (на примере Анадырской низменности) // Сб. докл. международ. науч. конф. “Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии” СПб., 2018. С. 141—146.
14. Трегубов О.Д. Реконструкция ледниковых процессов и поиски источников водоснабжения для Западно-Озерного газового месторождения // Вестн. СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 4. С. 20—27.
15. Трегубов О.Д., Уяганский К.К., Нутевкет М.А. Мониторинг мерзлотно-климатических условий Анадырской низменности // География и природ. ресурсы. 2020. № 2. С. 143—152.
16. Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 8—16.
17. Шепелёв В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.
18. Шепелёв В.В., Павлова Н.А. Основные составляющие подземного питания рек Якутии // Наука и образование. 2014. № 2. С. 117—120
19. Fedorov A.N., Gavriliyev P.P., Konstantinov P.Y., Hiyama T., Iijima Y., Iwahana G. Estimating the water balance of a thermokarst lake in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // Ecohydrol. 2014. V. 7 (2). P. 88—196. 2014. <https://doi.org/10.1002/eco.1378>
20. Koch J.C., Kikuchi C.P., Wickland K.P., Schuster P. Runoff sources and flow paths in a partially burned, upland boreal catchment underlain by permafrost // Water Resour. Res. 2014. V. 50 (10). P. 8141—8158.

21. *Quinton W.L., Baltzer J.L.* The active-layer hydrology of a peat plateau with thawing permafrost (Scotty Creek, Canada) // *Hydrogeol. J.* 2013. 21 (1). P. 201–220. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0935-2>
22. *Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.* Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43 (20). <https://doi.org/10.1002/2016GL070796>
23. *Tetzlaff D., Buttle J., Carey S.K., McGuire K., Laudon H., Soulsby C.* Tracer-based assessment of flow paths, storage and runoff generation in northern catchments: A review // *Hydrol. Processes.* 2015. 29 (16). P. 3475–3490. <https://doi.org/10.1002/hyp.10412>
24. *Tregubov O.D., Uyaganskiy K.K.* Daily and seasonal temperature inertia in the upper layers of permafrost // XI Int. Sympos. Permafrost Engineering. Book of abstracts. Magadan: Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, 2017. P. 142.