

## ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ БАССЕЙНОВ НА УДЕЛЬНЫЙ МЕЖЕННЫЙ СТОК МАЛЫХ РЕК НА СЕВЕРЕ И ЮГЕ ЧУКОТКИ

О.Д. Трегубов<sup>1</sup>, В.Ю. Разживин<sup>2</sup>, В.В. Шамов<sup>3</sup>, Л.С. Лебедева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт имени Н.А. Шило ДВО РАН, введ. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: tregubov2@yandex.ru

<sup>2</sup>Ботанический институт имени В.Л. Комарова РАН, ст. науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: volodyar@binran.ru

<sup>3</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: vlshamov@yandex.ru

<sup>4</sup>Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

Статья посвящена анализу ландшафтных факторов, определяющих сток малых рек Арктики и Субарктики крайнего северо-востока Азии. В работе рассматриваются гидрография, структура мерзлотных ландшафтов и их гидрохимическая характеристика, пространственная динамика меженного стока в бассейнах рек Угольная-Дионисия и Янранайваам. Установлено, что устойчивое питание рек обусловлено соотношением ландшафтов, генерирующих и депонирующих надмерзлотный сток: арктических гольцовых щебнистых кустарничковых тундр, равнинных кочкарных тундр и бугорковых болот. Меженный сток в пределах 20–50 л/(с·км<sup>2</sup>) типичен для истоков рек, в склоновых отложениях которых тают сезонные гольцовые льды и образуются конденсационные воды. На пологих склонах тундровых увалов талые воды внутригрунтовых почвенных сезонных льдов обеспечивают удельный сток в пределах 10–20 л/(с·км<sup>2</sup>). Депонируют надмерзлотные воды верховые и низинные болота, где их сток составляет менее 10 л/(с·км<sup>2</sup>). На примере двух водосборных бассейнов показано, что существенное уменьшение количества осадков на севере Чукотки практически целиком компенсируется образованием конденсационных вод. При этом внутригрунтовые сезонные инфильтрационные почвенные льды замещаются в арктических ландшафтах инфильтрационно-конденсационными гольцовыми льдами, талые воды которых восполняют потери поверхностного стока.

**Ключевые слова:** мерзлотные ландшафты, надмерзлотные воды, водный баланс малых рек, потепление климата

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.9

### ВВЕДЕНИЕ

Воздействие флуктуаций климата на сток рек в криолитозоне осложняется криогенными процессами [Walvoord et al., 2016]. Усиление надмерзлотного стока происходит за счет таяния подземных льдов, увеличения мощности надмерзлотного водоносного горизонта на склонах и в таликах [Liljedahl et al., 2016]. Критическое повышение количества осадков приведет к переувлажнению мерзлотных почв, которое замедляет рост глубины сезонного протаивания [Park et al., 2012]. Гидрологическая роль мерзлотных ландшафтов отражена в целом ряде российских публикаций [Тепловодообмен..., 2007; Лебедева и др., 2019; Василенко, 2013; Нестерова и др., 2018; Губарева и др., 2018; Гагаринова, 2012]. Описан процесс образования внутригрунтового льда в толще крупнообломочных склоновых отложений Колымского нагорья [Банцекина, Михайлов, 2009]. В работе О.Д. Трегубова с соавторами [2021] рассмотрены суточные циклы показателей речного стока и температуры, связанные с образованием конденсационных и

талых вод подземных льдов. По данным И.Т. Рейнюка (1959), конденсация водяных паров воздуха в грубообломочных отложениях в бассейне Колымы достигает 80 мм/год. Работы В.В. Климочкина [1975] и В.В. Шепелева [2011] свидетельствуют о значительной доле конденсационных вод в питании водоносных горизонтов в некоторых районах Центральной Якутии. Годовой объем конденсационных вод в стоке якутских рек изменяется от 15 до 50 мм [Банцекина и др., 2009]. Для большинства рек Западной Чукотки в последние годы выявлено увеличение стока за счет активизации таяния многолетних снежников, гольцового льда и других типов льдов в каменных глетчерах и иных крупнообломочных образованиях [Глотов, Ушаков, 2020].

Исследовать результат этих криогенных процессов можно путем комплексного сравнительного анализа ландшафтной структуры и пространственной динамики поверхностного стока на двух типичных речных водосборах, расположенных в различных природно-климатических и геокриологических условиях.

Цель настоящей работы – установить характер и степень влияния ландшафтных факторов на формирование стока малых рек в условиях субарктического и арктического морского климатов. Основное внимание работы сосредоточено на изучении сходства и различий климата, ландшафтов и криогенных процессов в двух типичных речных бассейнах, расположенных в пределах Анадырской и Чаунской низменностей.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В отличие от горных районов в низменностях прослеживается природная широтная зональность, в том числе мерзлотно-климатических условий. Климат на большей части Анадырской низменности – субарктический морской [Чукотка..., 1995]. Среднегодовая температура по данным метеостанции Анадырь за период с 1981 по 2010 г. равна  $-5^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>. Осадков выпадает в среднем 382 мм в год, из них более половины зимой. По данным Росгидромета с 1976 по 2016 г. среднегодовая температура воздуха повысилась на  $2,2^{\circ}\text{C}$ , годовая сумма осадков – на 66 мм. Мощность сплошной многолетней мерзлоты с севера на юг уменьшается от 300 до 50 м, в южных районах Чукотки она становится прерывистой. Температура мерзлых грунтов на подошве слоя годового теплооборота уменьшается с севера на юг от  $-7,1$  до  $-1^{\circ}\text{C}$ . Глубина сезонного протаивания изменяется от  $0,45-0,60$  м на пологих склонах тундровых увалов до  $0,60-1,5$  м на склонах гор и в поймах рек [Трегубов, 2017]. Анадырская низменность представляет собой равнину с отметками высот в диапазоне  $2-150$  м, расчлененную и обрамленную по краям горными сооружениями, отдельными горными поднятиями в виде кряжей и хребтов. Для рек типично весеннее половодье, прерывистый летне-осенний паводок и длительная устойчивая зимняя межень.

Климат северной части Чаунской низменности – арктический морской. Среднегодовая температура по данным метеостанции Певек за период с 1981 по 2010 г. составила  $-9,8^{\circ}\text{C}$ . Осадков выпадает 146 мм в год, примерно поровну в холодный и теплый периоды года. С 1976 по 2016 г. среднегодовая температура воздуха здесь повысилась на  $3,2^{\circ}\text{C}$ , а годовая сумма осадков уменьшилась на 87 мм. Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) уменьшается от горного обрамления низменности к побережью Чаунской губы от 400 до 160 м [Чукотка..., 1995]. Температура ММП изменяется от  $-7,5$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Мощность сезонно-талого слоя (СТС) на задернованных склонах равна  $0,4-0,6$  м и увеличивается до 1,5 м

на делювиальных осыпях и в поймах рек. В геоморфологическом отношении низменность представляет собой осушенную часть Чаунской губы, окруженную горами Чукотского нагорья и Анадырского плоскогорья. Реки здесь характеризуются весенне-летним половодьем, примерно равными ему по стоку летне-осенними паводками и устойчивой зимней меженью.

Основными объектами являются реки Угольная-Дионисия и Янранайваам (рис. 1).

*Река Угольная-Дионисия* в 15 км к западу от г. Анадыря впадает в Анадырский лиман. Длина реки – 24 км, площадь водосбора –  $96 \text{ км}^2$ , отметки высот водораздельной линии находятся в пределах  $110-580$  м абс., уреза воды – от 180 м в истоках до 2,5 м в устье.

*Река Янранайваам* берет начало на западных отрогах Шелагского хребта, наибольшая высота которого составляет 710 м (г. Туманная). Длина реки составляет 17 км, площадь водосбора –  $85,7 \text{ км}^2$ . В нижнем течении реки долина приобретает V-образный поперечный профиль, образованный склонами двух сопков высотой 300 и 360 м. Отметки уреза воды снижаются от 180 в истоках до 0 м абс. в устье.

Полевые исследования проведены на р. Угольная-Дионисия и Янранайваам в начале летней межени – с 1 по 10 июля в 2019 и 2020 гг. соответственно. На этот период приходится наибольшая скорость протаивания деятельного слоя, таяние сезонных льдов, начало внутригрунтовой конденсации, максимум вегетации растительности. Переход от половодья к летней межени позволяет отследить смену источников питания рек. Безусловно, краткосрочные исследования не могут заменить многолетние наблюдения на гидрологических постах, однако детальность и комплексность наблюдений в бассейнах малых рек позволяют получить данные о механизмах формирования стока, которые далеко не всегда обеспечиваются стандартными режимными наблюдениями.

В 2019 г. в пределах Анадырской низменности и в 2020 г. в Чаунской низменности погода мало отличалась от многолетних ее характеристик. Среднесуточная температура во время полевых работ 2019 г. в бассейне р. Угольная-Дионисия составила  $12,1^{\circ}\text{C}$ , сплошной снежный покров сошел за две недели до начала наблюдений, за это время выпало 5,9 мм жидких осадков, а в течение 10 дней полевых наблюдений – 1,5 мм. В окрестностях г. Певек снежный покров полностью стаял к началу третьей декады июня 2020 г. С 1 по 10 июля 2020 г. среднесуточная температура составила здесь  $12,3^{\circ}\text{C}$ , при этом выпало 4,9 мм осадков. Гидрологические условия в регионе в эти годы по данным наблюдений на ближайших гидрологических постах также близ-

<sup>1</sup> Здесь и далее информация по климату взята на сайте Гидрометцентра России: <https://meteoinfo.ru/>.

ки к норме, превышения критических паводковых уровней не наблюдалось.

Основным методом исследований авторов была маршрутная мерзлотно-гидрологическая съемка, включающая измерения мощности и влажности оттаявших горизонтов почвы, описание структуры растительного покрова, экзогенно-криогенных процессов и поверхностного стока на выбранных

участках водосборов. На участках с типичными или специфичными проявлениями ландшафтных условий в шурфах глубиной 0,5 м изучалось строение деятельного слоя. В местах впадения основных притоков производились измерения расходов и отбирались пробы воды (рис. 2). Общая плотность пунктов наблюдений соответствовала масштабу 1:50 000 (2, 3 точки на 1 км<sup>2</sup>).

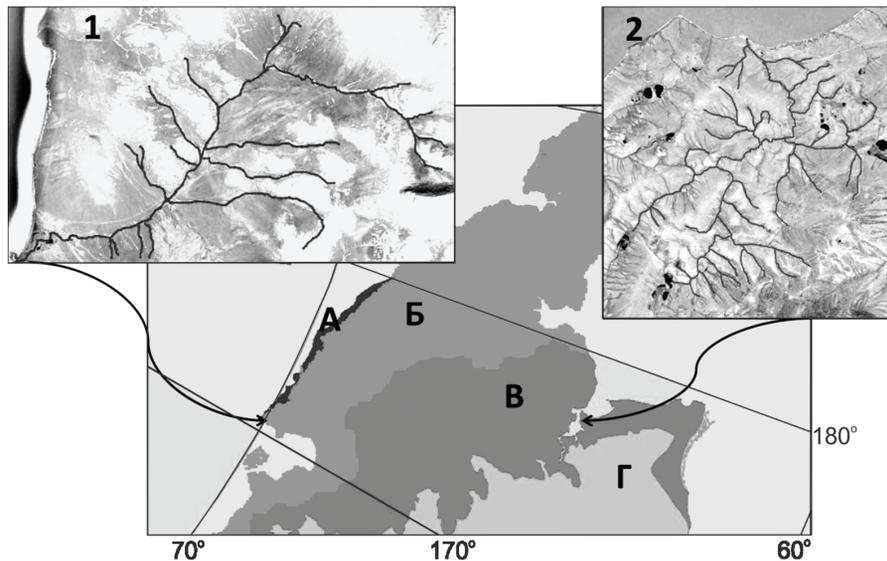


Рис. 1. Район и объекты исследований:

А – арктические тундры; Б – гипоарктические (субарктические) тундры; В – кустарниковые тундры; Г – лиственничные редколесья и кедровые стланики [Elvebakk et al., 1999; CAVM team, 2003]. На врезках бассейны рек: 1 – Янранайваам; 2 – Угольная-Дионисия

Fig. 1. Study area and objects:

A – Arctic tundra; Б – hypoarctic (subarctic) tundra; В – shrub tundra; Г – larch woodlands and cedar scrub [Elvebakk et al., 1999; CAVM team, 2003]. Insets, the basins of the rivers: 1 – Yanranaivaam; 2 – Dionisiya-Ugolnaya

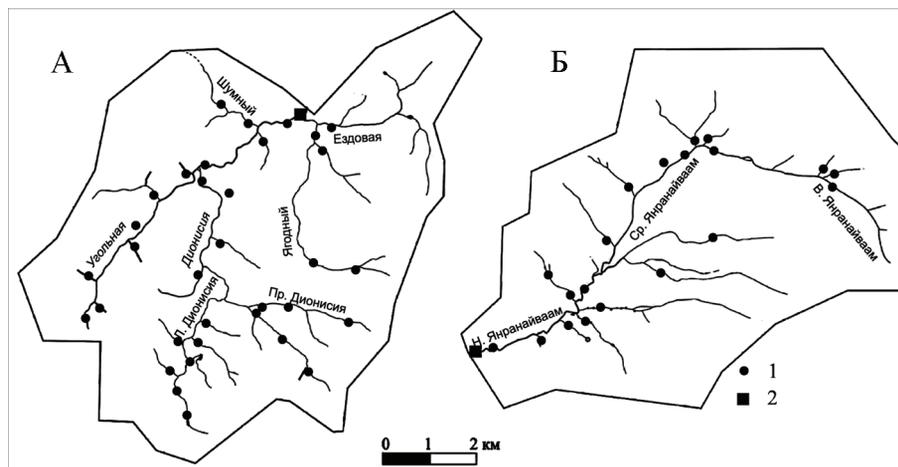


Рис. 2. Схемы опробования и гидрологических наблюдений в бассейнах Угольная-Дионисия (А) и Янранайваам (Б): 1 – точки разовых гидрологических наблюдений; 2 – точки режимных гидрологических наблюдений (закрывающие створы)

Fig. 2. Schemes of sampling and hydrological observations in the Ugolnaya-Dionisiya (A) and Yanranaivaam (B) river basins: 1 – sites of one-time hydrological observations; 2 – hydrological monitoring observation sites (main-stream stations)

Параллельно площадным работам в замыкающих створах обеих рек проводились измерения стока четыре раза в сутки с отбором проб воды и ежечасные измерения уровня воды. В ходе съемок и режимных наблюдений измерялись температура, электропроводность и рН воды, температура и влажность почв. При этом использовались вертушки «Поток-мкр ГР-100» и «Поток ГР21М»; влагомер «ТК100-01»; портативные кондуктометр СОМ-80 и рН-метр КЛ-911; цифровые логгеры НОВО ONSET – измерители уровней U20L-04, температуры U23-003 и влажности почв U23-002; а также металлический шуп 5×1200 мм и труба для отбора керна 32×1000 мм.

Для индикации условий формирования надмерзлотного стока в работе использовались гидрохимические данные. Всего было отобрано 104 пробы. В нефльтрованной пробе потенциометрическим титрованием определялось содержание гидрокарбонат-иона. После фильтрования в Центре ландшафтной экодиагностики и ГИС-технологий Тихоокеанского института географии ДВО РАН определяли содержание главных ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), общего железа (Fe) и растворенного органического углерода (РОУ) в воде.

Для пространственного моделирования применялся метод интерполяции Kriging пакета Golden Software Surfer. Пункты определений модуля стока, минерализации, концентрации ионов выносились в центры соответствующих водосборов на топографических картах в системе местных прямоугольных координат. При исследовании рельефа и составлении картосхемы мерзлотных ландшафтов использовались топографические карты масштабов 1:100 000–1:25 000, цифровые модели рельефа Arctic DEM, спутниковые снимки Google Earth [<https://www.google.com/earth/>].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для обоих речных бассейнов характерен древовидный рисунок гидрографической сети (см. рис. 1, 2): р. Дионисия имеет полигональный решетчатый рисунок, р. Угольная – перистый, а р. Ездоя – центробежные и дугообразные формы. В верховье р. Янранайваам по периметру чашеобразного расширения долины наблюдается веерообразный рисунок речной сети, ниже по левому борту долины рисунок речной сети ветвящийся, по правому борту – параллельный, что определяется геологическим строением и палеогеографией исследуемых бассейнов.

Главное геоморфологическое отличие бассейна р. Янранайваам – преобладание здесь денудации и обнажений горных пород: в ее верхнем и среднем течении вершины и крутые горные склоны занимают 26,2% площади водосбора, а на долю коллюви-

ально-делювиальных горных подножий приходится 18,1%. В бассейне р. Угольная-Дионисия осыпные с делювием склоны занимают менее 5% площади.

Соотношение площадей с преобладанием криогенных и посткриогенных процессов обратное: пологие склоны, покрытые чехлом четвертичных водно-ледниковых, морских и озерно-аллювиальных осадков в долине р. Угольная-Дионисия занимают 86,8%, а в бассейне Янранайваам – 25,2%.

В бассейне р. Угольная-Дионисия доминирующими и структурообразующими являются кочкарные кустарничковые мохово-пушицевые тундры (68% площади) (рис. 3А). В бассейне Янранайваам преобладают гольцы – 40,9%, пятнистые мохово-кустарничковые тундры – 32,5%, подгольцовые разнотравные мохово-кустарничковые тундры верхнего течения – 12,8% (см. рис. 3Б). Более 3% водосбора р. Угольная-Дионисия в горных истоках занимают ольховники. Доля водосбора р. Янранайваам в сравнении с бассейном Угольная-Дионисия, занятая болотными ландшафтами (тундроболотами), существенно меньше: верховыми – в 6 раз, склоновыми – в 11 раз, низинными – в 6 раз. Доля пойменных ландшафтов, наоборот, здесь по площади в два раза больше, чем в долине р. Угольная-Дионисия.

Для бассейна р. Янранайваам характерны меньшая сезонная льдистость, ограниченное распространение ПЖЛ, торфяных бугров пучения и термокарста, более интенсивное проявление морозобойного растрескивания и криотурбирования почв (табл.). Термоэрозия в обоих районах проявлена локально в супесчаной толще ледового комплекса. Меньшая степень задернованности горной части бассейна р. Янранайваам, широкое распространение крупнообломочных осыпей и более низкая температура ММП создают предпосылки для образования конденсационных вод.

В верховьях р. Угольная-Дионисия на контакте щебнистых тундр и ольховников в химическом составе надмерзлотных вод обнаружены нитраты в концентрациях 0,4–0,8 мг/л. Минерализация нейтральных (рН 6,8–7,0) гидрокарбонатных кальциевых вод изменяется от 20 до 60 мг/л. РОУ содержится в пределах 2–10 мг/л, концентрация общего железа – 0,10–0,25 мг/л. В условиях смешения поверхностных и подмерзлотных вод образуются нейтральные – слабощелочные (рН 7,2–7,4) гидрокарбонатные кальциевые воды с минерализацией 50–300 мг/л. Содержание в них РОУ составляет 2–4 мг/л, общего железа – менее 0,25 мг/л.

Для большей части площади распространения южных кочкарных тундр в бассейне р. Угольная-Дионисия характерны слабокислые до нейтральных (рН 5,0–6,6) хлоридно-гидрокарбонатные

магний-кальциевые воды с минерализацией 20–30 мг/л, содержанием РОУ – 12 мг/л, общего железа – 0,4–0,6 мг/л.

Верховые и низинные болота в наибольшей степени занимают верховья некоторых притоков и пойму р. Угольная-Дионисия в среднем течении (см. табл., рис. 3А). Здесь обнаруживаются слабокислые (рН 5–6) гидрокарбонатно-хлоридные магний-кальций-натриевые воды с минерализацией 6–12 мг/л. Сульфаты в этих водах не определены, содержание РОУ изменяется в пределах 10–17 мг/л, а железа достигает 1,8 мг/л.

В бассейне р. Янранайваам выходы подмерзлотных подземных вод обнаружены не были. В зоне распространения щебнистых тундр и лугов горных подножий верховья р. Янранайваам в гидрокарбонатных натриевых водах определены нитраты – до 1,6 мг/л, содержание РОУ при этом понижается до 1 мг/л, железа – до 0,01 мг/л. Там, где среди подгольцовых тундр и лугов горных подножий обнаруживаются участки кочкарных тундр, в водах, обогащенных нитратами, рН понижается до 6,4, концентрация РОУ повышается до 4 мг/л и железа – до 0,08 мг/л (см. рис. 3Б).

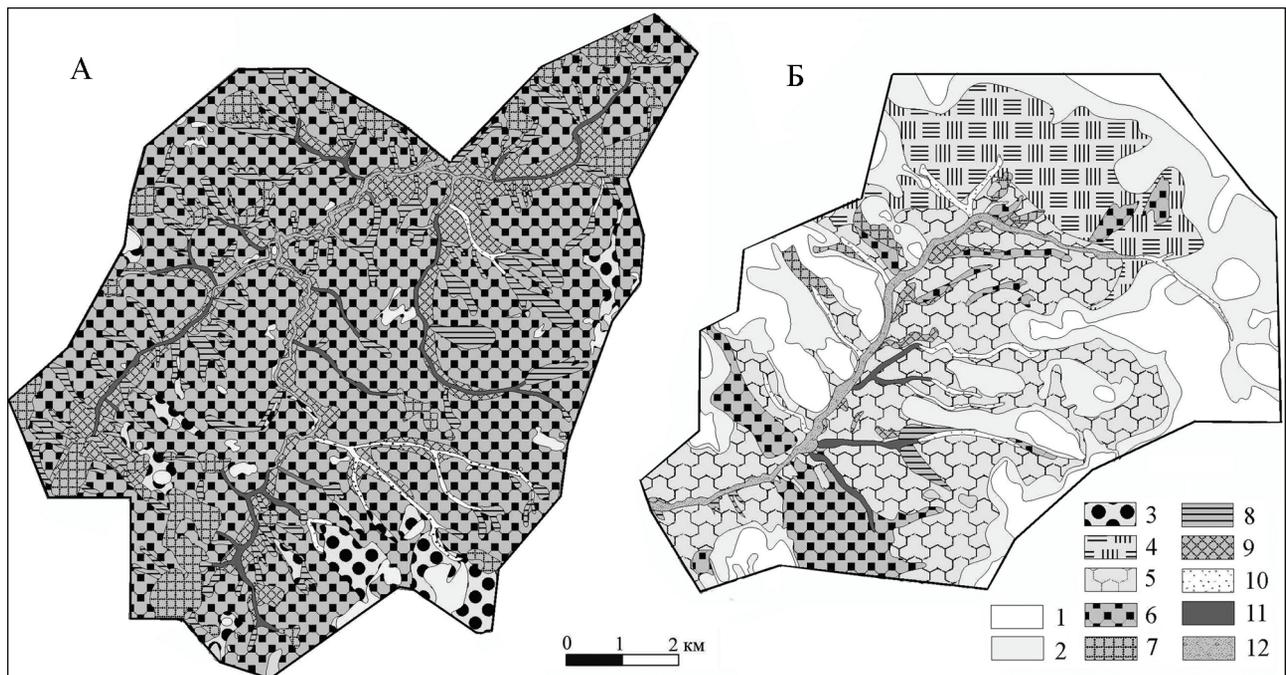


Рис. 3. Картограммы мерзлотных ландшафтов водосборных бассейнов (вверх по течению от контрольного створа) рек Угольная-Дионисия (А) и Янранайваам (Б):

1 – гольцовые куртинные простратнокустарничковые тундры; 2 – щебнистые пятнистые простратнокустарничковые тундры; 3 – ольховники горных подножий, берегов озер и рек; 4 – подгольцовые кустарничковые тундры и луга в горных подножьях; 5 – сухие пятнистые арктотундры; 6 – увлажненные кочкарные южные тундры; 7 – мелкобугорковые верховые тундровые болота; 8 – грядово-мочажинные тундровые болота; 9 – низинные тундровые болота солифлюкционных террас; 10 – поймы ручьев с валунно-галечным руслом; 11 – поймы ручьев с торфяным и песчано-глинистым руслом; 12 – пойма реки с галечно-песчаным и песчаным руслом

Fig. 3. Maps of permafrost landscapes of the catchment basins (upstream the control section) of the Ugolnaya-Dionisiya River (A) and the Yanranaivaam River (B):

1 – char tundra mountains; 2 – gravelly – spotted low – growing shrubby mountain tundra; 3 – alder bushes of mountain foothills, lake and river banks; 4 – low – growing shrub tundra and meadows in mountain foothills; 5 – dry spotted arctotundra; 6 – moistened hummocky southern tundra; 7 – small-hummocky tundra upland swamps; 8 – ridge-pool tundra bogs; 9 – tundra lowland bogs of solifluction terraces; 10 – floodplains of streams with boulder-pebble beds; 11 – floodplains of streams with peat and sand-clay beds; 12 – river floodplain with a pebble-sand and sandy bed

По содержанию главных ионов в водах в нижнем течении по левому борту долины обособляется район, где на фоне сухих пятнистых арктических тундр выделяются крупные участки заболоченных кочкарных тундр (см. рис. 3Б, табл.). Для этого района

характерны слабокислые (рН 5,5–6,5), обогащенные РОУ (6–25 мг/л) хлоридно-гидрокарбонатные кальций-натриевые воды. Общее содержание растворенных веществ в пределах 20–40 мг/л, общего железа – от 1 до 10 мг/л.

Таблица  
Сравнительный анализ структуры и характеристик мерзлотных ландшафтов бассейнов рек Угольная-Дионисия и Янранайваам

№	Ландшафт	Угольная-Дионисия			Янранайваам			
		$Ld_s$ , %	Криогенные процессы и рельеф	Почвы, мощность СТС, подземные льды	$S$ , %	$Ld_s$ , %	Криогенные процессы и рельеф	Почвы, мощность СТС, подземные льды
1	Гольцовые тундры горных вершин и крутых склонов					Вымораживание. Гольцовый	Гольцовые	17,6
2	Щебнистые мохово-кустарничковые тундры на горных террасах и склонах	<20	Вымораживание, дели. Нивальный	Примитивные грубогумусные, 1–1,5 м. Гольцовые	3	Вымораживание, дели. Нивальный	Примитивные грубогумусные, 1–1,5 м. Гольцовые	23,3
3	Ольховники горных подножий и берегов ручьев с мохово-кустарничково-разнотравным нижним ярусом	20–40	Вымораживание, дели, термоэрозия, термокарст. Структурный	Торфянистые, тундровые подбуры, 0,5–1 м. Сегрегационные	4,2			
4	Подгольцовые разнотравные и мохово-кустарничковые тундры склонов и террас				20–40	Вымораживание, криотурбирование, солифлюкция. Нивальный	Арктотундровые, подбуры, 0,4–1 м. Гольцовые	12,8
5	Сухие пятнистые мохово-кустарничковые арктотундры пологих склонов и террас				<20	Морозобойное растрескивание, криотурбирование. Трещинно-полигональный, медальонный	Арктотундровые, 0,4–0,8 м. Сегрегационные	32,5
6	Увлажненные кочкарные кустарничковые мохово-пушицевые тундры пологих склонов и террас	40–60	Солифлюкция, локально криотурбирование. Полигональный	Торфянистые, 0,5–0,6 м, сегрегационные, ПЖЛ	68	Солифлюкция, термоэрозия, термокарст. Остаточно-полигональный, термокарстовый	Торфянистые, 0,4–0,5 м, сегрегационные, ПЖЛ	8,3
7	Мелкобугристые кустарничковые мохово-осоковые верховые болота	80–90	Мерзлотное пучение, термокарст. Полигонально-жильный, западинно-бугристый	Торфяные, 0,4–0,5 м. Сегрегационные, ПЖЛ	6,2	Мерзлотное пучение, термокарст. Западинно-бугристый	Торфянистые, торфяные, 0,4–0,6 м. Сегрегационные, ПЖЛ	1
8	Грядово-мочажинные кустарничковые осоково-сфагновые тундроболота пологих склонов	60–80	Солифлюкция, термоэрозия. Грядово-мочажинный	Торфянистые, торфяные, 0,4–0,8 м. Сегрегационные	8,8	Солифлюкция, термоэрозия. Грядово-мочажинный	Торфянистые, торфяные, 0,4–0,8 м. Сегрегационные, ПЖЛ	0,8
9	Мелкобугристые ивовые осоково-сфагновые тундроболота низких террас	80–90	Мерзлотное пучение, термокарст. Полигонально-жильный, западинно-бугристый	Торфянистые, торфяные, 0,4–0,6 м. Сегрегационные, ПЖЛ	8	Мерзлотное пучение, термокарст, криотурбирование. Западинно-бугристый	Торфянистые, торфяные, 0,4–0,5 м. Сегрегационные, инъекционные	1,4

№	Ландшафт	Угольная-Дионисия			Янранайваам				
		$Ld_s$ , %	Криогенные процессы и рельеф	Почвы, мощность СТС, подземные льды	$S$ , %	$Ld_s$ , %	Криогенные процессы и рельеф	Почвы, мощность СТС, подземные льды	$S$ , %
10	Поймы ручьев с валунно-галечным руслом, с кустарниками и разнотравной растительностью	20–40	Курумы. Локально низовальный и наледный	Аллювиальные дерновые, 1–1,5 м. Погребенные наледи	0,1	<20	Курумы. Локально низовальный и наледный	Аллювиальные дерновые, 1–1,5 м. Погребенные наледи	0,4
11	Поймы ручьев с торфяным и песчано-глинистым руслом, с ивово-осоковой растительностью	60–80	Солифлюксия, мерзлотное пучение, термокарст. Термокарстовый, западинно-бугристый	Аллювиальные болотные, 0,4–1 м. Сегрегационные, ПЖЛ	1	40–60	Солифлюксия, термокарст, термоэрозия. Термокарстовый, западинно-бугристый	Аллювиальные болотные, 0,4–1 м. Сегрегационные, инъеционные	0,5
12	Пойма реки с галечно-песчаным и песчаным руслом с ивой, кустарничково-мохово-осоковой растительностью	20–80	Мерзлотное пучение, термокарст. Термокарстовый, западинно-бугристый	Аллювиальные лугово-болотные, 0,6–1,0 м. Инъеционные, ПЖЛ	0,7	20–60	Мерзлотное пучение, термокарст. Термокарстовый, западинно-бугристый	Аллювиальные лугово-болотные, 0,6–1,0 м. Инъеционные, погребенные наледи	1,4

Примечание.  $N$  – номер в условных обозначениях рис. 4;  $Ld_s$  – льдистость почв;  $S$  – доля проективного покрытия на картосхеме на рис. 3.

С 1 по 10 июля в 2019 и 2020 гг. по данным инструментальных гидрологических наблюдений отмечено 10-кратное падение расхода воды на контрольном створе обеих рек и практически равный модуль стока на начало летней межени (рис. 4). Как видно на графиках, величина и скорость уменьшения стока почти в два раза больше в бассейне р. Янранайваам. Здесь же отмечается локальное увеличение удельных расходов воды с 1 по 3 июня. Небольшой слой дождя (1–4 мм) не оказывает воздействие на сток и никак не проявляет себя в конце первой декады июля, что видно на графике (рис. 4Б).

Изменения стока притоков 1–3 порядков в пределах исследуемых бассейнов показаны с по-

мощью изолиний (рис. 5). На схемах достаточно уверенно можно выделить три зоны: 1) с модулем стока более 20 л/(с·км<sup>2</sup>), 2) от 10 до 20 л/(с·км<sup>2</sup>) и 3) менее 10 л/(с·км<sup>2</sup>). Для р. Угольная-Дионисия доли водосбора, занимаемые этими зонами, составляют соответственно 12,1, 38,1 и 49,8%. Первая зона соответствует площади распространения щебнистых мохово-кустарничковых тундр и ольховников, вторая – умеренно заболоченных кочкарных мохово-пушицевых тундр (см. рис. 3Б, 5Б), а третья приурочена к верховым и низинным тундроболотам. Диапазоны отметок рельефа в выделенных зонах соответственно – 100–400, 20–200 и 10–100 м абс.

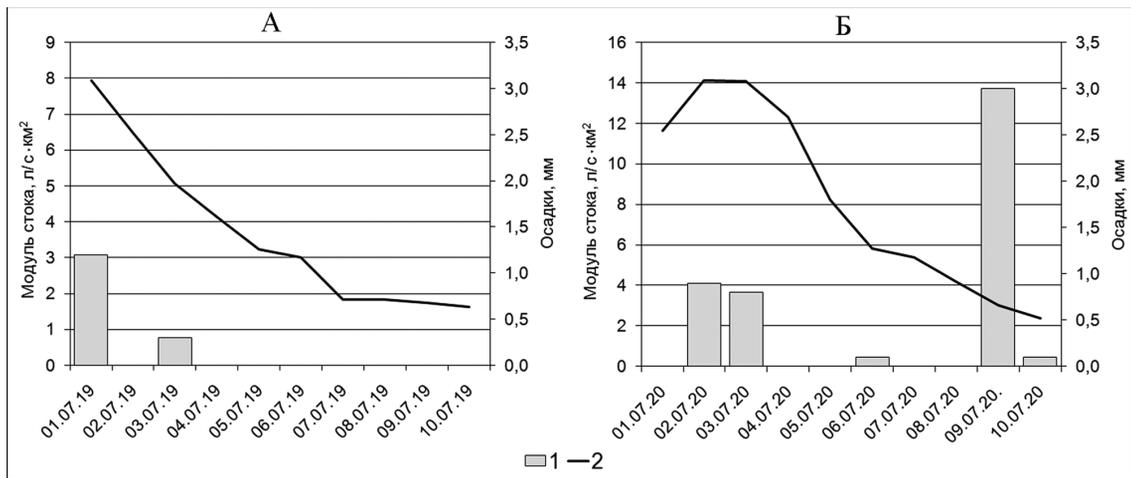


Рис. 4. Изменения стока рек Угольная-Дионисия (А) и Янранайваам (Б) в начале летней межени:

1 – суточное количество выпавших осадков; 2 – модуль стока, рассчитанный по расходу воды в замыкающем створе

Fig. 4. Changes in the specific flow of the Ugolnaya-Dionisiya (A) and Yanranaivaam (B) rivers at the beginning of summer low-water period: 1 – daily precipitation; 2 – specific discharge calculated according to water runoff at the main-stream station

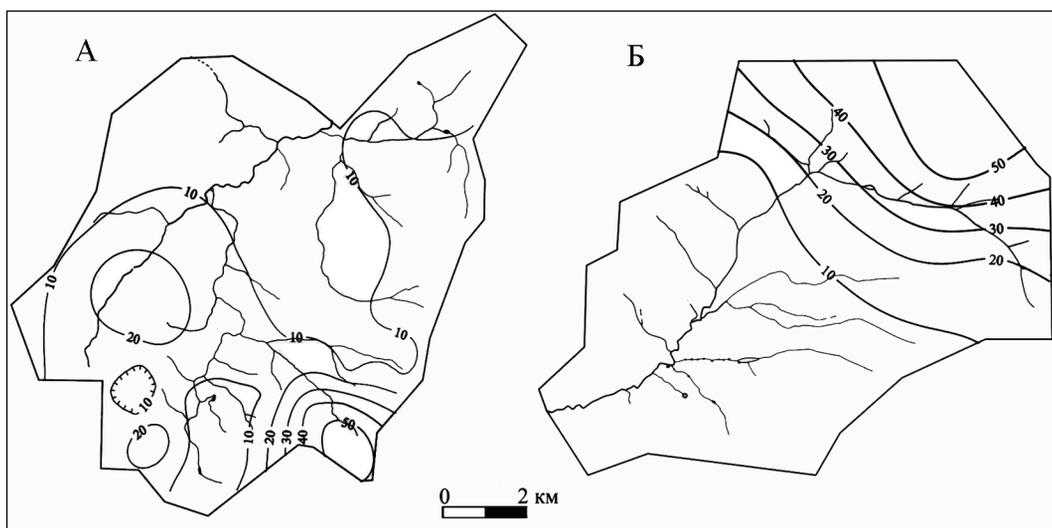


Рис. 5. Схемы изолиний модуля стока (л/(с·км<sup>2</sup>)) водотоков 1–3-го порядков в бассейнах р. Угольная-Дионисия (А) и р. Янранайваам (Б)

Fig. 5. Schemes of specific discharge (l/(sec·km<sup>2</sup>)) of 1 to 3-order watercourses in the Ugolnaya-Dionisiya River (A) and the Yanranaivaam River (B) basins

Распределение долей площади водосбора р. Янранайваам, занимаемых указанными зонами, иное: 1 – 38,6; 2 – 15,5; 3 – 45,9% соответственно. В бассейне р. Янранайваам первой зоне соответствуют гольцовые, щепнистые и подгольцовые мохово-кустарничковые тундры в интервале высоты рельефа 100–600 м. Некоторое исключение в плане высоты рельефа составляет вошедшая в первую зону надпойменная терраса в днище долины реки с пятнистыми кустарничковыми арктотундрами. Диапазон абсолютных высот рельефа во второй зоне – 25–250 м, в отличие от первой крутизна и длина склонов здесь меньше, а их площадь в равной пропорции занимают гольцовые и пятнистые мохово-кустарничковые арктотундры. Третья область стока приурочена к существенному распространению увлажненных кочкарных мохово-пушицевых тундр на террасовидных склонах с высотой рельефа в пределах 15–300 м.

По мнению авторов, такое зонирование удельного стока связано с биологическим потреблением воды растениями в начале лета. Немаловажным является рост среднесуточной температуры воздуха в период наблюдений с 9 до 19°C в Анадыре и с 5 до 17°C в Певеке, когда наблюдается активная вегетация и рост глубины протаивания с 10–15 до 25–30 см в Анадырской и с 10 до 25–35 см в Чаунской тундре.

Пространственная организация надмерзлотного стока р. Янранайваам выглядит более простой. Область максимальных значений межлетнего удельного стока приурочена к участкам современной денудации коллювиально-делювиальных отложений с разреженным растительным покровом и примитивными почвами, т. е. там, где есть благоприятные условия для образования конденсационных вод и гольцовых льдов (см. рис. 3Б). В этой области отмечены минимальные значения минерализации, РОУ и железа, нейтральная или слабощелочная реакция надмерзлотных и речных вод. Состав их отличается от талых вод снежников, что свидетельствует о незначительном вкладе последних в формирование стока. На горных террасах и в их подножьях, покрытых кочкарными тундрами и тундроболотами, модуль стока уменьшается за счет заболачивания деятельного слоя; кислотность воды, содержание РОУ и железа в воде здесь возрастают. Высокие значения нитратов и сульфатов в воде истоков и основной реки авторы связывают с сульфидной минерализацией горных пород и нитрификацией органо-генных отложений почв и донного ила в условиях площадного дренажа насыщенных кислородом вод и наличия азотфиксирующих растений в растительном покрове кустарничковых тундр и лугов (астргалы, копеечник арктический и другие виды семейства бобовых).

Вторая область с модулем стока 10–20 л/(с·км<sup>2</sup>) расположена в пределах горного подножия и днища долины, покрытых пятнистыми арктотундрами, кочкарными тундрами и тундроболотами, с существенно низкими величинами латеральной фильтрации и относительно высоким испарением влаги. На правом борту долины р. Янранайваам, где доминируют кустарничковые тундры, воды имеют нейтральную реакцию, РОУ содержится до 2–3 мг/л, а железа также менее 0,01 мг/л. На левобережье, где возрастает доля болот, растет кислотность вод (рН 5,8–6,1), содержание РОУ увеличивается до 5 мг/л, железа – до 0,4 мг/л.

Минимальные значения удельного надмерзлотного стока свойственны как минимум трем генетически различающимся типам ландшафтов. В правом борту долины р. Янранайваам в среднем течении, на террасированных склонах южной экспозиции с обнажениями коренных скальных горных пород надмерзлотный (точнее поверхностный) сток контролируется выпавшими осадками и скоростью таяния снежников в весенне-летний период. Именно здесь самая высокая густота эрозионного расчленения поверхности, чаще всего встречаются практически сухие расщелины, гроты, водопады. Мест с условиями, благоприятными для образования гольцовых льдов и конденсационных вод, здесь меньше.

На южном и северном склонах среднего и нижнего течения реки интенсивность стока ограничивают заболоченные пологие склоны, где надмерзлотные воды аккумулируются торфянистыми и торфяными почвами, встречаются озера различного размера. Воды этой области водосбора отличаются относительно высокой минерализацией и кислотностью, содержанием РОУ до 25 мг/л и железа – до 10 мг/л. Нитратов не обнаружено, содержание сульфатов минимально.

В нижнем течении реки эрозионного расчленения бортов долины нет. Воды отличаются максимальной в бассейне минерализацией, кислотностью, содержанием РОУ и железа. Минимальные значения модулей стока здесь обусловлены пологим рельефом, слабой латеральной фильтрацией деятельного слоя и относительно высокой транспирацией.

С потеплением климата следует ожидать увеличения глубины протаивания и мощности коллювиально-делювиальных покровов с ростом количества конденсационных вод и гольцовых льдов, что позволит сохранить или даже повысить летний сток р. Янранайваам даже при уменьшившемся количестве жидких осадков. В зоне распространения пойменных заболоченных кочкарных тундр увеличение глубины протаивания обеспечит дополнительное питание подрусловых таликов и увеличит зимний сток реки.

В отличие от р. Янранайваам в бассейне р. Угольная-Дионисия в области с модулем стока 20–50 л/(с·км<sup>2</sup>) распространены ольховники с разнотравным ярусом. Преобладание здесь линейного стока над площадным и отсутствие сплошной полосы кустарничковых тундр обусловило снижение нитратов в составе надмерзлотных вод. Область со средним удельным стоком 10–20 л/(с·км<sup>2</sup>) характеризуется доминированием кочкарных тундр на выпуклых склонах. Солифлюкционные и нивальные надпойменные террасы здесь заняты низинными болотами. По кислотности, содержаниям РОУ и железа надмерзлотные воды близки к характеристикам третьей зоны р. Янранайваам. Плотность дренажной сети невысокая, в формировании склонового стока принимают участие веерные и ветвящиеся ложбины стока [Тарбеева и др., 2021]. Условий, благоприятных для образования конденсационных вод, не обнаружено. Основным источником питания надмерзлотных вод в период межени являются талые воды льдистых верхних горизонтов почвы (см. табл.). Надпойменные снежники в данном районе являются дополнительным источником питания реки, что подтверждается здесь локальным снижением кислотности, содержания РОУ и железа в надмерзлотных водах. С другой стороны, снежники существенно замедляют таяние почв и тем самым уменьшают объем талых вод сезонных льдов [Трегубов и др., 2021].

Минимальные значения модуля надмерзлотного стока на плоских увалах и вогнутых склонах связаны с распространением верховых болот, полигональных тундр с термокарстовыми просадками, а также водораздельных озер. Здесь доминируют солифлюкция и термокарст, в меньшей степени термоэрозия. Надмерзлотные воды отличаются высокой кислотностью при низкой минерализации, высоким содержанием РОУ и железа. В качестве основных источников питания надмерзлотных вод меженного периода, как и в предыдущем случае, здесь выступают талые воды сезонных льдов верхних горизонтов почв, которые дополняются талыми водами ПЖЛ. Приводораздельные озерно-болотные котловины аккумулируют часть талых снеговых вод весной, которые затем по мере протаивания деятельного слоя участвуют в питании надмерзлотных вод.

Увеличение глубины протаивания в условиях потепления климата, очевидно, приведет к локальному усилению термокарста и заболачиванию бас-

сейна р. Угольная-Дионисия. Возрастание объема конденсационных вод в силу редкости гольцов не окажет существенного влияния на сток. Увеличение количества осадков повысит влажность почв и замедлит рост глубины протаивания. При этом возрастет сезонная льдистость торфяных и торфянистых почв. В результате ожидается сохранение в ближайшей перспективе водного баланса реки при выравнивании стока в летнюю и зимнюю межень.

## ВЫВОДЫ

Равенство предмеженного стока двух рек южной и северной Чукотки при различном среднемноголетнем количестве атмосферных осадков (382 и 146 мм) может быть обусловлено поясностью и зональностью тундр, что выражено в снижении высотного положения гольцового пояса с юга на север. В этом же направлении на равнинах сокращается доля задернованной поверхности, уменьшается мощность почвенного профиля и надмерзлотного водоносного горизонта, возрастает доля кустарничков в растительном покрове, усиливается морозное выветривание и криотурбирование. В итоге на фоне зонального уменьшения атмосферного увлажнения практически в том же объеме увеличивается объем конденсационных вод, а внутригрунтовые сезонные инфильтрационные почвенные льды замещаются в ландшафте инфильтрационно-конденсационными гольцовыми льдами, которые при таянии восполняют недостаток атмосферной влаги, участвующей в стокоформировании.

При сохранении современных тенденций и темпов изменения мерзлотно-климатических условий в течение ближайших десятилетий существенных изменений речного стока малых тундровых рек не произойдет. Изменения коснутся внутриводораздельного перераспределения стока за счет региональных изменений условий аккумуляции надмерзлотных вод или роста фильтрационных свойств деятельного слоя. Прогнозируемая устойчивость и запас прочности речных систем в ранге ландшафтного района обусловлены достаточным разнообразием внутри бассейнов геоморфологических и геокриологических условий, зональных тундровых почв и растительности. При потеплении климата ожидается сглаживание сезонных колебаний стока, образование новых и расширение существующих русловых таликовых зон, появление в долинах рек интразональных пойменных ландшафтов.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60036). Авторы выражают благодарность Б.И. Гарцману, А.М. Тарбеевой и Т.С. Губаревой за научные консультации и участие в полевых работах; А.Г. Болдескулу за аналитические исследования проб воды; К.К. Уяганскому, М.А. Нутевекет за участие в полевых работах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банцеккина Т.В., Михайлов В.М. К оценке роли внутри-грунтовой конденсации водяных паров в формировании теплового и водного режимов крупнообломочных склоновых отложений // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 1. С. 40–45.
- Василенко Н.Г. Гидрология рек зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2013. 672 с.
- Гагаринова О.В. Ландшафтно-гидрологические закономерности формирования стока в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 55–60.
- Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек западной Чукотки // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 6. С. 33–44.
- 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.
- Климочкин В.В. К вопросу о роли конденсации в формировании ресурсов грунтовых вод // Вопросы гидрогеологии криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1975. С. 157–164.
- 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 субэаральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 1. С. 40–50.
- Нестерова Н.В., Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Лебедева Л.С. Моделирование процессов формирования стока зоны БАМ на основе данных полигона Могот // Водное хозяйство России. 2018. № 1. С. 18–38.
- Рейнюк И.Т. Конденсация в деятельном слое вечной мерзлоты // Тр. ВНИИ-1. 1959. Вып. 13. С. 1–24.
- Тарбеева А.М., Трегубов О.Д., Лебедева Л.С. Структура склоновой ложбинной сети криолитозоны в окрестностях г. Анадыря // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 1. С. 109–120.
- Тепловодообмен мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири и его факторы / А.Г. Георгиади, А.Н. Золотокрылин, Р.В. Десяткин и др. М.; Тверь: Триада, 2007. 576 с.
- Трегубов О.Д., Гарцман Б.И., Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Шенелев В.В. Пространственная и временная динамика источников питания и водного режима реки Угольная-Дионисия (Анадырская низменность, Чукотка) // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 1–12.
- Трегубов О.Д. Геохимические барьеры в почвах и ландшафтах Анадырской тундры // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 3. С. 70–79.
- Чукотка: Природно-экономический очерк. М.: Арт-Литэкс, 1995. 370 с.
- Шенелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.
- Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P. et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology, *Nature Geoscience*, 2016, vol. 9, p. 312–318, DOI: 10.1038/ngeo2674.
- Park H., Walsh J., Fedorov A.N., Sherstikov A.B., Iijima Y., Ohata T. The influence of climate and hydrological variables on opposite anomaly in active layer thickness between Eurasian and North American watersheds, *The Cryosphere Discuss.*, 2012, vol. 6, p. 2537–2574, DOI: 10.5194/tcd-6-2537-2012, URL: <http://www.the-cryosphere-discuss.net/6/2537/2012/>.
- Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost - A Review, *Vadose Zone Journal*, 2016, vol. 15, iss. 6, 20 p., DOI: 15. 10.2136/vzj2016.01.0010.

Поступила в редакцию 27.03.2021

После доработки 04.03.2022

Принята к публикации 27.06.2022

## THE INFLUENCE OF BASIN LANDSCAPE PATTERN ON SPECIFIC LOW-WATER FLOW OF SMALL RIVERS IN THE NORTH AND SOUTH OF CHUKOTKA

O.D. Tregubov<sup>1</sup>, V.Yu. Razzhivin<sup>2</sup>, V.V. Shamov<sup>3</sup>, L.S. Lebedeva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Shilo Northern-East Complex Scientific-Research Institute FEB RAS, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: tregubov2@yandex.ru

<sup>2</sup>Komarov Botanical Institute RAS, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: volodyar@binran.ru

<sup>3</sup>Pacific Geographical Institute FEB RAS, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: vlshamov@yandex.ru

<sup>4</sup>Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

The article analyses landscape factors that determine the runoff of small Arctic and Subarctic rivers in the far northeast of Asia. The paper considers hydrography, structure of permafrost landscapes and their hydrochemical characteristics, and the spatial dynamics of low-water runoff in the basins of the Ugolnaya-Dionisiya and Yanranayvaam rivers. It has been established that sustainable water intake depends on the ratio of landscapes generating and depositing the permafrost runoff, namely Arctic char gravelly shrub tundra, lowland tussock tundra and hummock swamps. The low-water runoff of 20–50 l/km<sup>2</sup>·sec is typical for the sources of rivers, where seasonal char ice melts in the slope deposits and condensation waters are formed. Melt water of seasonal intra-surface soil ice on the gentle slopes of tundra hummocks provides specific runoff of 10–20 l/km<sup>2</sup>·sec. Upland and lowland marshes deposit above-frozen waters, and their runoff is less than 10 l/km<sup>2</sup>·sec. Using

the example of two catchment basins, it is shown that the decrease in precipitation in the north of Chukotka is almost completely compensated by the formation of condensation waters. At the same time, in-ground seasonal infiltration soil ice is replaced in Arctic landscapes by infiltration-condensation char ice, and its melt water makes up for the loss of surface runoff.

**Keywords:** permafrost landscapes, permafrost waters, water balance of small rivers, climate warming

**Acknowledgements.** The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-05-60036). The authors express their thanks to B.I. Gartsman, A.M. Tarbeeva and T.S. Gubareva for scientific advices and participation in field work; to A.G. Boleskul for analyzing water samples; and to K.K. Uyagansky and M.A. Nutevetket for participation in field work.

## REFERENCE

- Bantsekina T.V., Mihajlov V.M. *K ocenke roli vnutrigruntovoj kondensacii vodyanyh parov v formirovanii teplovogo i vodnogo rezhimov krupnooblomochnyh sklonovyh otlozhenij* [To the evaluation of the role of intra-ground condensation in thermal and water regimes of coarse-grained slope deposits], *Kriosfera Zemli*, 2009, vol. 13, no. 1, p. 40–45. (In Russian)
- CAVM Team 2003, *Circumpolar Arctic vegetation map, scale 1:7 500 000*, Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map, no. 1, U.S. Fish and Wildlife Service, Anchorage.
- Chukotka: Prirodno-ekonomicheskij ocherk* [Chukotka: Essay on Nature and Economy], Moscow, Art-Litex Publ., 1995, 370 p. (In Russian)
- Gagarinova O.V. Landscape-hydrological regularities of runoff formation within the Lake Baikal watershed basin, *Geography and Natural Resources*, 2012, no. 3, p. 218–222.
- Gidrologiya zabolochennyh territorij zony mnogoletnej merzloty Zapadnoj Sibiri* [Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia], Saint Petersburg, VVM Publ., 2009, 536 p. (In Russian)
- Glotov V.E., Ushakov M.V. Climate-related changes in the runoff of polar rivers in Western Chukotka, *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. 24, no. 6, p. 27–37.
- Gubareva T.S., Gartsman B.I., Vasilenko N.G. Sources of river flow formation in the zone of permafrost: estimation by the methods of tracer hydrology according to the data of regime hydrochemical observations, *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. 22, no. 1, p. 29–40.
- Klimochkin V.V. [On the role of condensation in the formation of groundwater resources], *Voprosy gidrogeologii kriolitozony* [Issues of cryolithozone hydrogeology], Yakutsk, Institute of Permafrost Studies of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1975, p. 157–164. (In Russian)
- Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I., Abramov A.A., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M., Fedorov M.P., Nesterova N.V., Makarieva O.M. Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin, *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, no. 1, p. 35–44.
- Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P. et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology, *Nature Geoscience*, 2016, vol. 9, p. 312–318, DOI: 10.1038/ngeo2674.
- Nesterova N.V., Makar'eva O.M., Vinogradova T.A., Lebedeva L.S. Modelirovanie processov formirovaniya stoka zony BAM na osnove dannyh poligona Mogot [Modeling of the processes of flow formation in the BAM zone based on the materials of the Mogot site], *Water Management in Russia*, 2018, no. 1, p. 18–38. (In Russian)
- Park H., Walsh J., Fedorov A.N., Sherstiukov A.B., Iijima Y., Ohata T. The influence of climate and hydrological variables on opposite anomaly in active layer thickness between Eurasian and North American watersheds, *The Cryosphere Discuss.*, 2012, vol. 6, p. 2537–2574, DOI: 10.5194/tcd-6-2537-2012, URL: <http://www.the-cryosphere-discuss.net/6/2537/2012/>
- Rejnyuk I.T. *Kondensatsiya v deyatelnom sloe vechnoj merzloty, Trudy VNII-1* [Condensation in the active permafrost layer, Proceedings of the All-Union Research Institute 1], Magadan, 1959, vol. 15, 24 p. (In Russian)
- Shepelev V.V. *Nadmerzlotnye vody kriolitozony* [Permafrost waters of the cryolithozone], Novosibirsk, Geo Publ., 2011, 169 p. (In Russian)
- Tarbeeva A.M., Tregubov O.D., Lebedeva L.S. Struktura sklonovoj lozhbinnoj seti kriolitozony v okrestnostyah g. Anadyrya [Structure of the slope runoff network of the cryolithozone in the vicinity of Anadyr], *Geomorphology*, 2021, vol. 52, no. 1, p. 109–120. (In Russian)
- Teplovodoobmen merzlotnyh landshaftov Vostochnoj Sibiri i ego faktory* [Heat and water exchange in permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors], A.G. Georgiadi, A.N. Zolotokrylin, R.V. Desjatkin i dr., Moscow, Tver, Triad Publ., 2007, 576 p. (In Russian)
- Tregubov O.D., Gartsman B.I., Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Shepelev V.V. Spatial and temporal dynamics of sources and water regime of the Ugolnaya-Dionisiya River (Anadyr Lowland, Chukotka), *Water resources*, 2021, vol. 48, no. 4, p. 427–438.
- Tregubov O.D. Geohimicheskie bar'ery v pochvah i landshaftah Anadyrskoj tundry [Geochemical barriers in soils and landscapes of the Anadyr Tundra], *Vestn. Mosk. unta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, no. 3, p. 70–79. (In Russian)
- Vasilenko N.G. *Gidrologija rek zony BAM: Ekspedicionnye issledovaniya* [Hydrology of rivers in the Baikal-Amur Mainline zone: Expedition research], Saint Petersburg, Nestor-History Publ., 2013, 672 p. (In Russian)
- Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost – A Review, *Vadose Zone Journal*, 2016, vol. 15, iss. 6, 20 p., DOI: 15.10.2136/vzj2016.01.0010.

Received 27.03.2021

Revised 04.03.2022

Accepted 27.06.2022