

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 911.2

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.004

СОВРЕМЕННЫЕ УСЛОВИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАЛЫХ РЕК ЮГА ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Виктор Алексеевич Иванов¹, Всеволод Михайлович Морейдо², Кристина Николаевна Прокопьева³, Анна Михайловна Тарбеева⁴, Роман Александрович Колесников⁵, Сергей Романович Чалов⁶

^{2, 4, 6}Лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^{1, 2, 3, 6}Кафедра гидрологии суши, географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

²Институт водных проблем, Москва, Россия

¹viktoro.1998@yandex.ru

²vsevolod.moreydo@iwp.ru

³prokris3@mail.ru

⁴amtarbeeva@yandex.ru

⁵roman387@mail.ru

⁶hydroserg@mail.ru

Аннотация. Климатические изменения в Арктике сопровождаются интенсификацией эрозионных и русловых процессов, частично обусловленной таянием многолетней мерзлоты. В статье представлены результаты гидрологических исследований, которые были организованы в 2022 году в южной части Ямало-Ненецкого автономного

округа. Дается анализ современных трендов гидроклиматических изменений, приводятся результаты комплексного гидрогеохимического обследования 41 водотока на субширотном участке Салехард – Надым – Уренгой, использованного для обоснования водосборов стационарного мониторинга эрозионных процессов. Обсуждаются особенности организованных стационарных наблюдений скорости отступления берегов, интенсивности овражной эрозии, уровня и ледового режима на реки Васъеган в бассейне Нижней Оби, на двух смежных водосборах рек Маханад-Пусьяха и Выерьяха в бассейне реки Надым и на водосборе реки Седэ-Яха в бассейне реки Пур. Приводится анализ первичных результатов мониторинга. **Ключевые слова:** овражная эрозия, русловые процессы, криолитозона, мониторинг, Субарктика.

Цитирование: Иванов В.А., Морейдо В.М., Прокопьева К.Н., Тарбеева А.М., Колесников Р.А., Чалов С.Р. Современные условия гидрологических процессов малых рек юга Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (120). № 3. С. 52-75. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.004.

Original article

MODERN CONDITIONS OF HYDROLOGICAL PROCESSES OF SMALL RIVERS IN THE SOUTH OF THE YAMALO-NENETS AUTONOMOUS DISTRICT

Victor A. Ivanov¹, Vsevolod M. Moreido², Kristina N. Prokopieva³, Anna M. Torbeeva⁴, Roman A. Kolesnikov⁵, Sergey R. Chalov⁶

^{2, 4, 6}*The Makkaveev laboratory of soil erosion and fluvial processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^{1, 2, 3, 6}*Land Hydrology department, Geography faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁵*Arctic Research Center, Salekhard, Russia*

²*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

¹*viktoro.1998@yandex.ru*

²*vsevolod.moreydo@iwp.ru*

³*prokris3@mail.ru*

⁴*amtarbeeva@yandex.ru*

⁵*roman387@mail.ru*

⁶*hydroserg@mail.ru*

Abstract. Climate change in the Arctic is accompanied by an intensification of erosion and channel processes, partly due to the thawing of permafrost. The article presents the results of hydrological studies that were organized in 2022 in the southern part of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. An analysis of current trends in hydroclimatic changes is given, and the results of a comprehensive hydrogeochemical survey of 41 watercourses in the sublatitudinal section of Salekhard - Nadym - Urengoy, used to substantiate catchment areas for stationary monitoring of erosion processes, are presented. The features of organized stationary observations of the rate of bank retreat, the intensity of ravine erosion, and the level and ice regime on the Vasyogan rivers in the Lower Ob basin, on two adjacent catchment areas of the Makhanad-Pusyakha and Vyeryakha rivers in the Nadym river basin, and on the catchment area of the Sede-Yakha river in the Pur river basin are discussed. An analysis of the primary results of monitoring is given.

Keywords: gully erosion, channel erosion processes, cryolithozone, monitoring.

Citation: V.A. Ivanov, V.M. Moreido, K.N. Prokopyeva, A.M. Tarbeeva, R.A. Kolesnikov, S.R. Chalov Modern conditions of hydrological processes of small rivers of the South of the Yamalo-Nenets Autonomous District // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (120). No 3. P.52-75. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.004.

Введение

Территория Ямало-Ненецкого автономного округа является одним из наиболее освоенных регионов Российской Арктики, что определено его топливно-энергетическим потенциалом и выгодным транспортным положением [1]. Вместе с тем обширное распространение в автономном округе рыхлых высокотемпературных многолетнемёрзлых пород, восприимчивых к тепловому воздействию, ставит под угрозу безопасность эксплуатации существующих и проектируемых инженерных сооружений. Геологическое строение региона, его песчаные и суглинистые почвы, тон-

кий и легконарушаемый растительный покров определяют низкую устойчивость региона к водной эрозии. Прохождение южной границы сплошной криолитозоны по территории ЯНАО определяет значительные риски в связи с мерзлотными процессами и явлениями, обусловленными деградацией мерзлых пород. На территории округа развиты термокарст, термоэрозия, пучение; по берегам рек, озер, заливов Карского моря развиваются криогенные оползни, солифлюкция, термоабразия [2, 3]. Помимо усиления ряда криогенных процессов, увеличение температуры мерзлых пород приводит к снижению несущей способности фундаментов ниже проектных значений, что уже наносит ежегодные миллиардные ущербы [4].

Одновременно с интенсификацией опасных криогенных процессов из-за увеличения температуры происходит трансформация процессов формирования речного стока [5]. В то же время детальных сведений об этих процессах на территории малых водосборов ЯНАО нет. В этой связи в 2022 году осуществлена организация сети наблюдений за региональными характеристиками температуры, осадков и водного стока, организованы стационарные площадки эрозионных наблюдений. Выбор бассейнов был основан на результатах комплексного гидрохимического обследования водотоков на участке Салехард–Надым–Уренгой. Целью данной статьи является представление первичных результатов этих наблюдений, в том числе обоснование выбора пилотных бассейнов и методов гидрологических наблюдений. В заключение статьи изложены основные идеи продолжения мониторинговых работ.

Материалы и методы

Гидрохимическое обследование водотоков на участке Салехард – Надым – Уренгой

В ходе полевых работ в сентябре 2022 г. проведены обследования водотоков по трассе Салехард–Надым–Уренгой. За период с 20-го по 25 сентября был обследован 41 водоток, протекающий на территории водосборов в пределах бассейнов рек Оби, Полуй, Надым, Пур. Состав наблюдений на водотоках включал измерение следующих физико-химических показателей воды: температура воды ($^{\circ}\text{C}$), водородный показатель pH, удельная электропроводность (мкСм/см) и оптическая мутность воды (NTU).

Так, средняя температура воды в водотоках в период проведения измерений составила $6,6^{\circ}\text{C}$ с увеличением до $9,9^{\circ}\text{C}$ (бассейн р. Ярудей), а минимальная температура воды составила $3,9^{\circ}\text{C}$ (р. Хадыга). Средняя удельная электропроводность изучаемых водотоков невысокая и характеризуется величиной $81,9$ мкСм/см с уменьшением до $8,5$ мкСм/см

(р. Тыдыльяха) на водотоках, где, вероятнее всего, происходит обильное питание талыми надмерзлотными водами, и с увеличением до 511 – 519 мкСм/см (притоки р. Полуй р. Танопча, р. Малая Хойъяха), размывающие минерализованные коренные породы. По водородному показателю рН водотоки относятся к нейтральной среде (средний показатель 7,7). По показателю оптической мутности воды водотоки характеризуются невысокими значениями замутненности (среднее значение 19,8 NTU), однако в условиях высокой антропогенной нагрузки мутность воды может увеличиваться до 165 NTU (р. Васъёган – нижняя станция мониторинга в районе полигона ТБО), и наоборот – в условиях, где антропогенное воздействие полностью отсутствует, мутность воды может принимать значения 1,76 NTU (р. Васъёган – верхняя станция мониторинга в 6,5 км выше

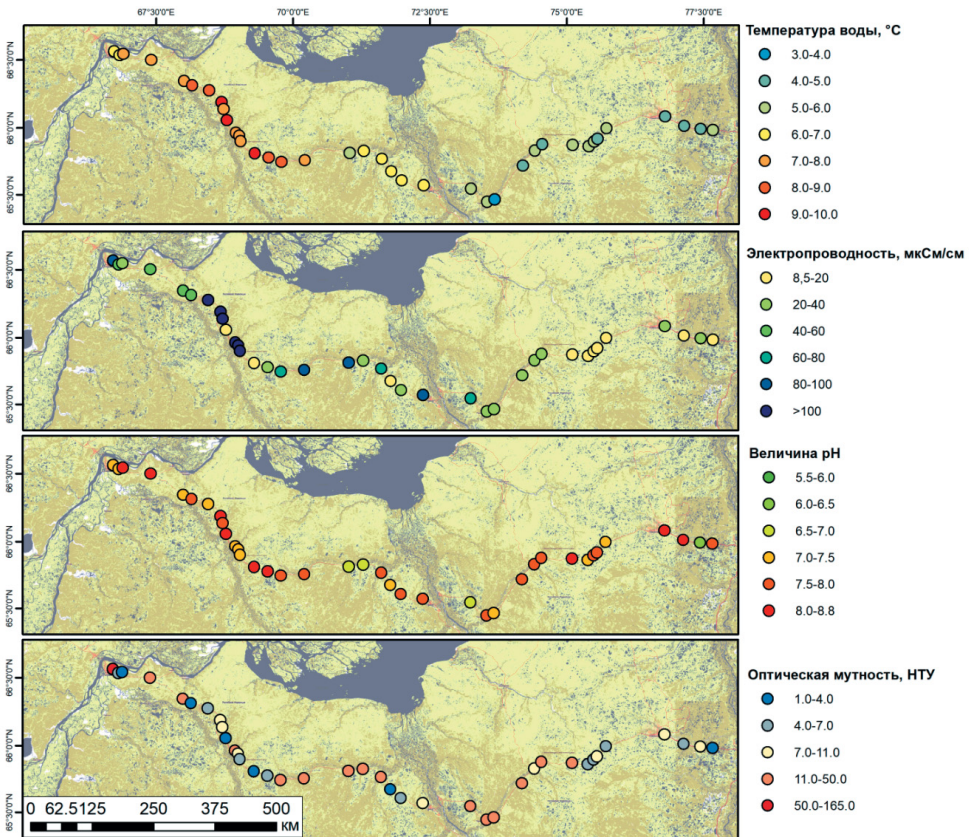


Рис. 1. Карта-схема изменчивости характеристик качества воды водотоков юга ЯНАО.

Примечание: а) температуры воды (°C), б) электропроводности (мкСм/см), в) величины рН, г) оптической мутности (NTU) водотоков по результатам измерений 20-25 сентября 2022 г.

по течению от нижней станции мониторинга в районе полигона твердых коммунальных отходов).

При визуальном анализе полученных карт-схем (рис. 1) наблюдается уменьшение температуры воды при движении от западной к восточной части участка Салехард – Надым – Уренгой. Аналогичная тенденция наблюдается и для показателя электропроводности воды. По водородному показателю рН и оптической мутности воды подобных тенденций к изменению не обнаружено.

Для выявления закономерностей изменения характеристик стока проведена дифференциация водотоков по бассейнам, которым эти водотоки принадлежат. Всего к бассейну р. Оби относится 9 точек измерений, к р. Полуй – 8 измерений, к р. Надым – 16 измерений и к р. Пур – 8 измерений. По бассейнам рек наблюдаются сильные отклонения по величинам удельной электропроводности: если в исследуемых реках бассейна р. Полуй эта величина достигает 251 мкСм/см, то в водотоках бассейна р. Пур данная характеристика составляет лишь 17,6 мкСм/см. В то же самое время водотоки бассейна р. Оби характеризуются повышенной мутностью воды, в среднем это значение для рек бассейна составляет 49,4 NTU, а в реках бассейна р. Пур – наоборот. Здесь мутность всех водотоков составляет менее 10 NTU, в среднем – 6,67 NTU. Водотоки с малой мутностью принадлежат также бассейну р. Полуй (среднее значение мутности составляет лишь 7,38 NTU). По величине водородного показателя рН среднее значение по всем бассейнам входит в диапазон 7,6-7,9, что, вероятнее всего, связано с локальными факторами, влияющими на величину рН (см. табл. 1).

Таблица 1. Средние значения физико-химических показателей изучаемых водотоков по бассейнам крупных рек

Бассейн	t, °C	ae, мкСм/см	pH	S, NTU
р. Обь	7,03	48,9	7,70	49,4
р. Полуй	8,53	252	7,93	7,38
р. Надым	6,24	47,6	7,58	15,9
р. Пур	4,93	17,6	7,63	6,67

Результаты наглядно свидетельствуют об отличных условиях формирования стока малых рек бассейнов Оби, Полуя, Надыма и Пура, что легло в обоснование расположения водосборов стационарного изучения гидрологических и эрозионных процессов в разных частях южной части ЯНАО.

Обоснование бассейнов стационарного мониторинга гидрологических и эрозионных процессов и методы наблюдений на них

Критерии выбора модельных водосборов и станций мониторинга были следующими:

1. Модельные водосборы должны располагаться в каждом из бассейнов: Нижняя Обь, Надым, Пур.

2. Преимущество отдавалось водосборам с возможностью заложения двух удаленных друг от друга станций мониторинга (при наличии подъездных дорог) для выявления масштабного эффекта процессов формирования стока.

3. Станции мониторинга должны быть типичными для территории и модельных водосборов.

4. Для выявления влияния климатических изменений на формирование стока станции мониторинга должны характеризовать естественное состояние водосбора.

5. Расположение станций мониторинга должно обеспечивать сохранность установленного оборудования.

На основе этого, а также с учетом отмеченной неоднородности условий формирования стока, были выбраны следующие модельные водосборы: р. Васъёган в бассейне Нижней Оби, два смежных водосбора Маханяд-Пусьяха и Вьерьяха в бассейне Надыма и водосбор р. Седэ-Яха в бассейне р. Пур (рис. 2).

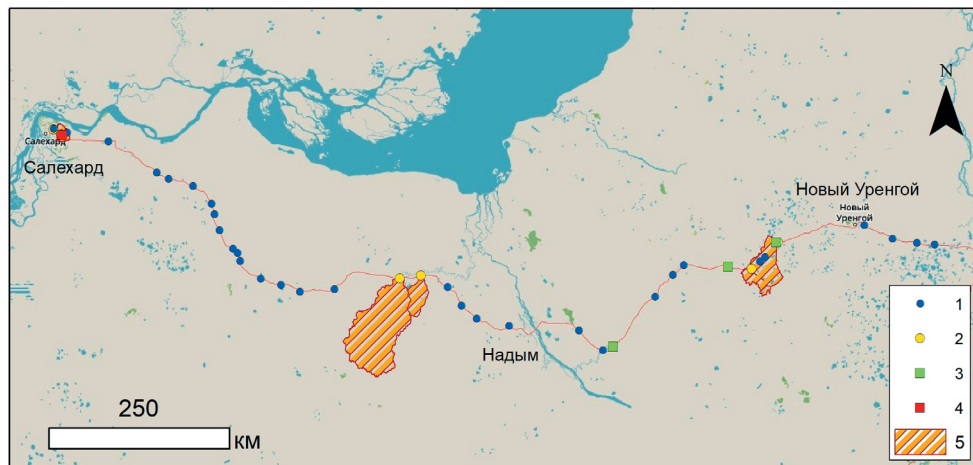


Рис. 2. Карта-схема расположения точек проведения измерений.

Примечание: 1 – точки базовых определений качества воды; 2 – станции мониторинга; 3 – стационарные площадки наблюдений овражной эрозии; 4 – стационарные площадки наблюдений береговой эрозии; 5 – модельные водосборы

Рассматриваемые территории характеризуются плоским рельефом, уклоны поверхности изменяются в диапазоне от 0,5 до 2,0%. Плоский рельеф обуславливает слабый поверхностный сток и широкое поверхностное заболачивание территории. Понижения рельефа заняты озерами, имеющими, как правило, округлую форму. Они имеют площади в диапазоне от 0,1 до 0,2 км², реже до 1,0 км². Глубина озер в среднем составляет от 0,4 до 0,8 м. В геологическом отношении территории представляют собой морские террасы мелового и более позднего возраста [6, 7]. Перекрывающие их четвертичные отложения представлены преимущественно суглинками и супесями, что в условиях многолетней мерзлоты определяет возможность развития пучения грунтов, солифлюкции и термокарста. Наименьшим по площади является водосбор Васъегана, в пределах исследуемых створов площади составляют 58,8 км² и 18,5 км². Тем не менее данный водосбор имеет наибольшее значение падения реки (5,21 м/км и 12,5 м/км), другими словами, водосбор имеет более расчлененное строение. В свою очередь остальные створы исследуемых водосборов, кроме верхнего створа р. Седэ-Яха, имеющего падение в 4,37 м/км, имеют низкое падение менее 2 м/км. Площадь водосбора на исследуемом створе р. Маханяд-Пусъяха составляет 1287 км², на нижнем створе р. Седэ-Яха – 396 км², на р. Выеръяхе – 174 км² и на верхнем створе р. Седэ-Яха – 101 км².

По данным Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (ЕГРПР) [8], на водосборе Васъегана доминируют подзолы иллювиально-гумусовые, на водосборе Маханяд-Пусъяхи доминируют глеево-дифференцированные почвы, водосборы Седэ-Яхи и Выеръяхи заняты, в основном, торфяными болотными почвами. Действительно, водосборы Выеръяхи и Седэ-Яхи сильно заболочены и заозерены, в отличие от р. Васъеган.

Все исследуемые водосборы расположены в зоне лесотундры. Для данной зоны характерно смешение ландшафтов южной тундры и северной тайги. В геоботаническом отношении район исследования расположен в таежной зоне, подзоне лиственнично-кустарничково-зеленомошных сосновых лесов и редколесий, а также лишайниково-сфагновых олиготрофных северо-таежных болот.

Для оценки поверхностного покрова было предложено использовать автоматическое дешифрирование ESA WorldCover 2021 с разрешением в 10 м [9]. В данном ресурсе на основе данных дистанционного зондирования Земли методами кластеризации был выделен ряд классов землепользования. С помощью круговых диаграмм (рис. 3) можно увидеть, в каком процентном соотношении разные типы подстилающего покрова представлены для водосборов. Например, для Маханяд-Пусъяхи определяется наибольшая залесенность 58%, для Васъегана – 24% (11% и 19% – для модельных створов), для Седэ-Яхи – 6% (11% и 2% – для модельных

створов), у р. Выерьяха – 6%. Наибольшая заозеренность характерна для р. Выерьяха – 10%, у р. Седэ-Яха – 8%, для водосборов Васъегана и Маханийд-Пусяхи озера занимают около 1%. На всех водосборах площадь антропогенных объектов 1% и менее.

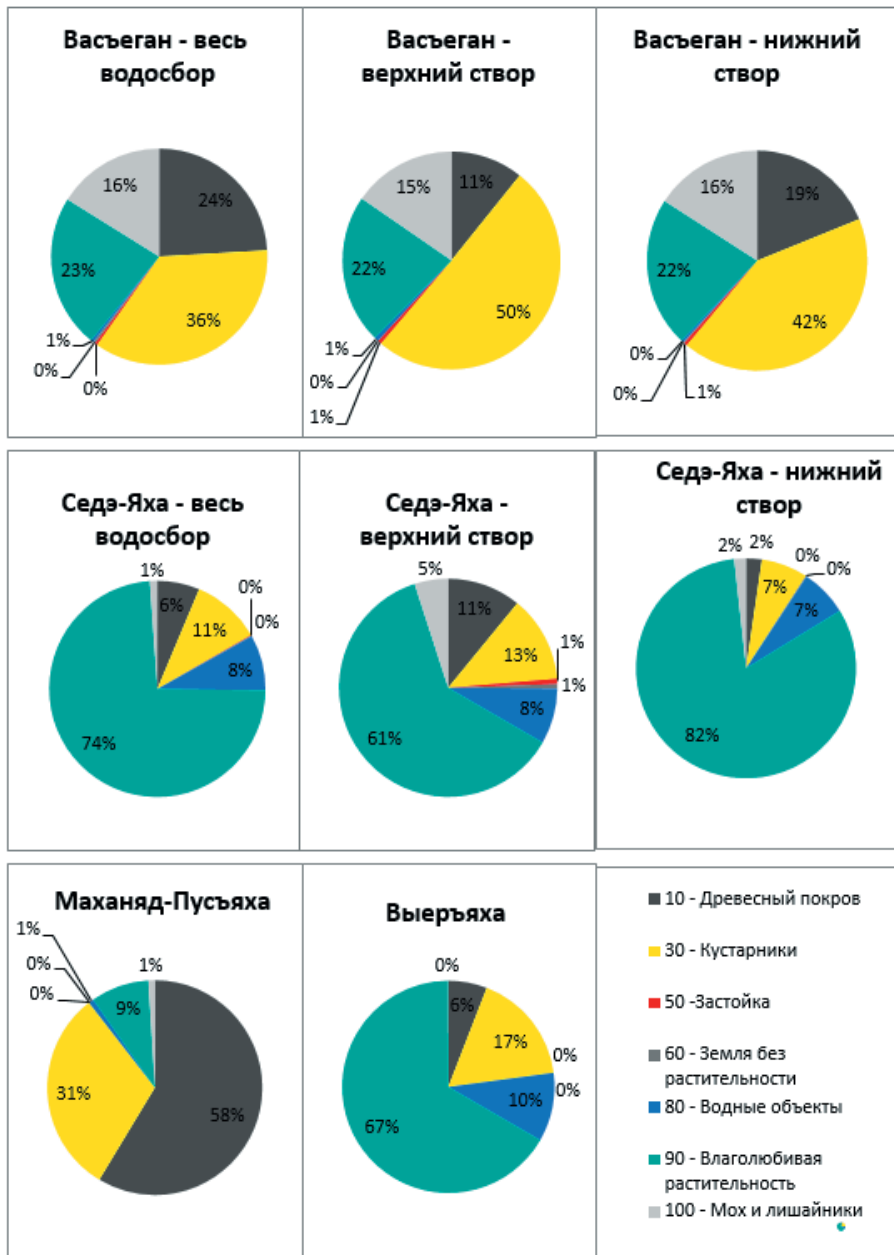


Рис. 3. Распределение типов подстилающего покрова по водосборам

В легенде ESA WorldCover содержится класс «90 – Влаголюбивая растительность», пока недостаточно оснований использовать данный показатель как кластер, отвечающий за расположение болот, но при визуальном сопоставлении данных автоматического дешифрирования и спутниковых снимков видно, что класс «90» и периодически затопляемые территории в целом совпадают. Используя термин «заболоченность» в качестве характеристики этого класса «90», можно сказать, что водосбор Седэ-Яхи является наиболее «заболоченным», в зависимости от створов данный показатель варьируется от 61% (верхний створ) до 82% (нижний створ). Выерьяха имеет «заболоченность» 67%, р. Васъеган имеет «заболоченность» 22-23%. Наименее «заболочен» водосбор Маханяд-Пусьяхи – 9%.

На станциях мониторинга проводились измерения расходов воды, отбор проб воды на мутность и содержание органического вещества, отбор проб донных отложений, проводилась установка самописцев (логгеров) уровней, температуры и мутности воды, автоматических фотокамер (фотоловушек) и датчиков температуры и влажности воздуха.

Для мониторинга уровней воды были использованы автономные приборы ERG-TP-01, предназначенные для периодической регистрации и хранения значений температуры и давления в течение длительного периода времени. Данный датчик, погруженный в воду, производит измерение абсолютного давления с частотой 1 раз в минуту, что позволяет рассчитать уровень воды за счёт разницы с атмосферным давлением. Для перехода от измеренных автономными регистраторами уровней воды в реках к оценкам объема стока, проходящего через живое сечение реки, в котором установлен регистратор, требуется составление зависимости расходов и уровней воды в гидростворе, что требует совместных измерений уровней и расходов воды.

Измерение расхода воды проводилось при помощи электромагнитного измерителя скорости водного потока Посейдон-1 и промеров глубины вручную с использованием размеченной через каждые 5 см вешки.

Полевое измерение мутности воды производилось при помощи турбидиметра «Nach» в относительных единицах рассеяния световых волн (NTU). Лабораторное определение взвеси в объемных концентрациях (мг/л) проводилось в отобранных пробах воды гравиметрическим методом с использованием мембранных фильтров и фильтровальной установки Millipore. Пробы воды отбирались с поверхности в пластиковую бутылку объемом 2 л. Совместные измерения позволили в дальнейшем перейти от относительных единиц мутности к весовым. Параллельно с отбором проб воды для фильтрации проводилось измерение физических свойств воды, таких как удельная электропроводность (κ , мкСМ/см), температура воды (Т, °С), показатель рН с помощью портативного мультимонитора ЕС/TDS/pH/Temp HM Digital HM-200.

Устанавливаемые автоматические фотокамеры (фотоловушки) предназначены для оценки состояния русла в период между наблюдениями (замерзание, вскрытие рек и т.п.) и более корректной интерпретации результатов записи логгеров. Они фиксировались на деревьях с учетом максимальной маскировки и возможности закрепить их с видом на русло. Датчики температуры и влажности воздуха фирмы Ibutton использовались в дополнение к метеостанциям для выявления локального микроклимата и устанавливались на высоте 2 м над землей на деревьях вблизи русла.

Эрозионный мониторинг направлен на определение динамики малых эрозионных форм (оврагов) и размыва речных берегов. В его основе лежит сопоставление повторных аэрофотопланов и цифровых моделей рельефа, полученных путем аэрофотосъемки с квадрокоптера, оснащенного GPS. Для получения первых фотопланов и цифровых моделей рельефа съемка выбранных участков проводилась квадрокоптером DJI Mavic mini с высоты 30-100 м (в зависимости от размера участка и необходимой детальности снимков) с перекрытием снимков не менее 60%, камера при этом направлена вертикально вниз. Полученные снимки обрабатывались в программе Agisoft Metashape для получения цифровых моделей рельефа и ортотрансформации фотопланов. Точность итоговых ортофотопланов составляет 1-2 см, цифровых моделей рельефа – 5-7 см (рис. 4).

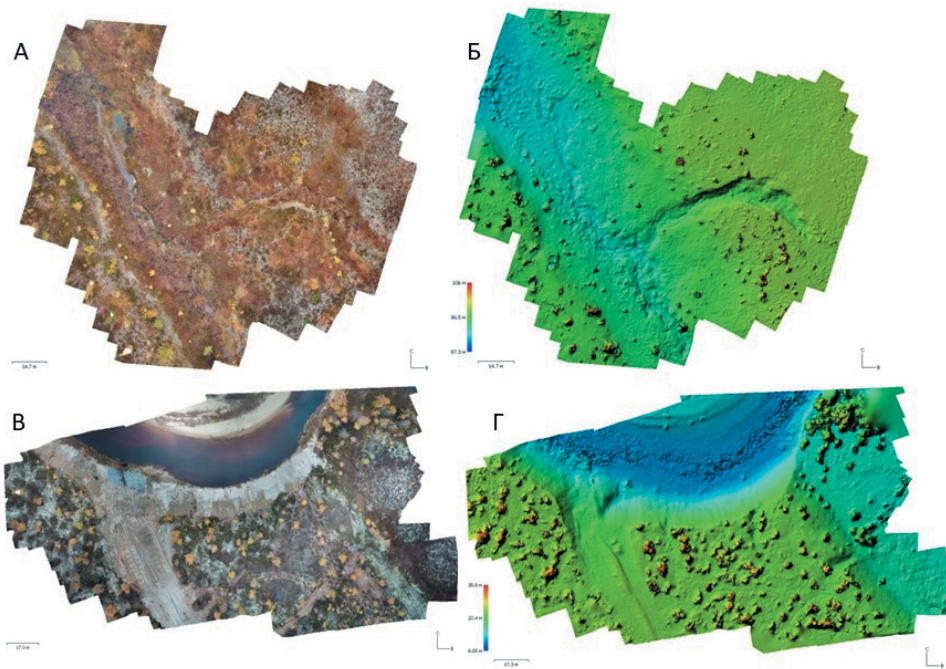


Рис. 4. Ортофотопланы (А и В) и цифровые модели местности (Б, Г) по данным аэрофотосъемки

Для более точной привязки снимков на каждом из участков предварительно закладывались не менее 4 опорных точек – реперов (стальные штыри), которые на время съемки отмечаются на местности ярким цветом. При наличии технической возможности дополнительно производится геодезическая привязка опорных реперов при помощи геодезической навигационной системы (GNSS). При отсутствии такой возможности снимки сопоставляются между собой по опорным точкам. Сопоставление ортофотопланов производится в ГИС-пакете QGIS. Выполнены цифровые модели рельефа исследуемых территорий (рис. 5).

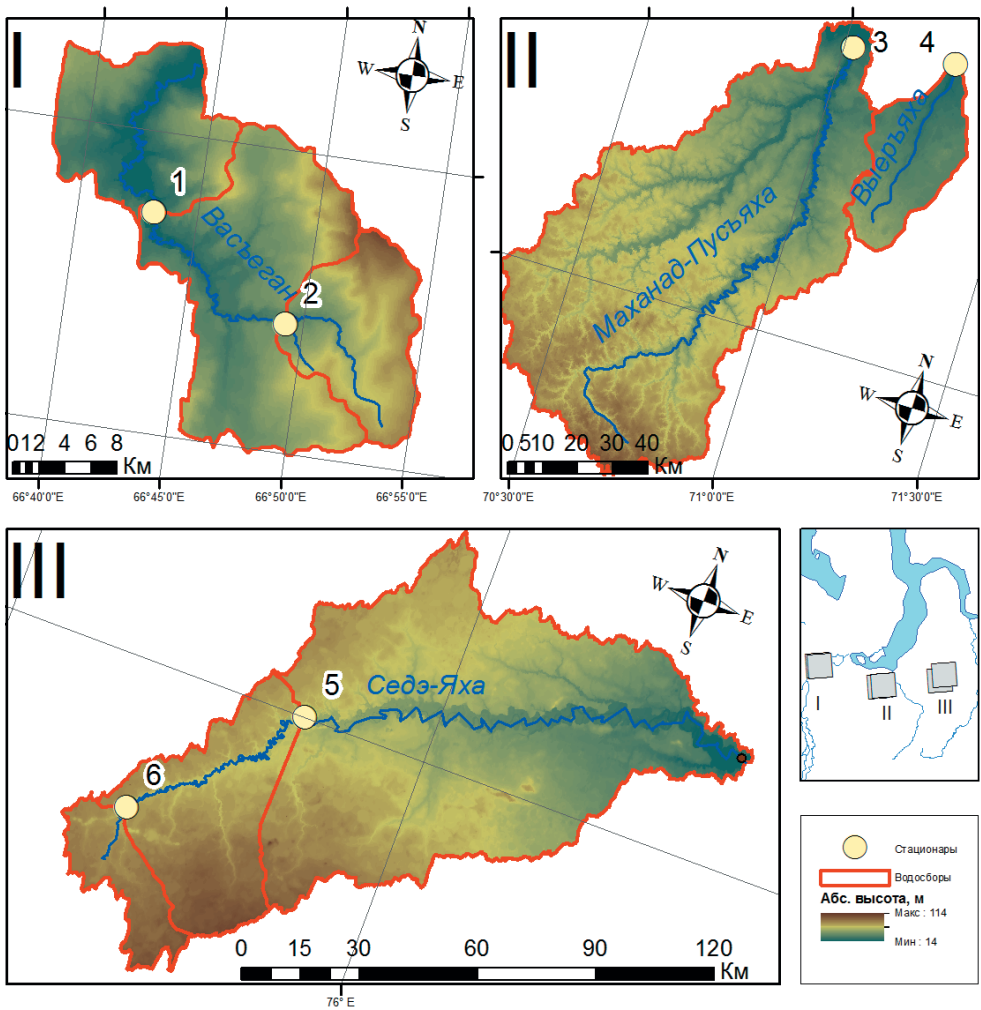


Рис. 5. Цифровая модель рельефа исследуемых территорий

*Результаты и обсуждение**Первые результаты наблюдений.**Гидрометеорологическая характеристика водосборов*

Обоснование и организация наблюдений сопровождались сбором доступных данных о гидрометеорологических характеристиках территории и их анализе. Многолетние наблюдения за метеорологическими характеристиками на территории района исследований проводятся на четырех опорных станциях Росгидромета, которые приурочены к крупным населенным пунктам: Салехард, Надым, Новый Уренгой, Тарко-Сале. Для данных метеостанций были взяты многолетние ряды характеристик среднесуточных температур воздуха и сумм осадков как наиболее существенных факторов, влияющих на речной сток и интенсивность эрозионных процессов.

Анализ среднестатистических характеристик исследуемых рядов с метеостанций Росгидромет (см. табл. 2) показал, что на данной территории средняя многолетняя среднегодовая температура воздуха составляет от 5,1 до -6,3 °С, ее изменчивость находится в пределах 1,62-1,91 °С, а коэффициент вариации в пределах 0,27-0,37. Среднемаксимальная среднесуточная температура воздуха достигает 22,5-24,5 °С.

Таблица 2. Характеристики рядов наблюдений за метеопараметрами на территории исследования

Индекс ВМО	Название	Период	N, лет	T, °С	P, мм	σ_T , °С	σ_P , мм	Cv_T	Cv_P	Tmax	Hmax
23330	Салехард	1882-2021	133	-5,9	387	1,62	113,9	0,273	0,294	22,0	27,0
23358	Новый Уренгой	1981-2021	42	-6,3	460	1,82	57,4	0,288	0,125	24,0	28,0
23445	Надым	1959-2021	62	-5,1	502	1,91	87,1	0,376	0,174	24,5	28,9
23552	Тарко-Сале	1936-2021	85	-5,5	504	1,90	88,7	0,347	0,176	24,3	29,8

Примечание: ВМО – Всемирная метеорологическая организация.

Среднее годовое количество осадков колеблется от 387 до 504 мм. Изменчивость суммы осадков находится в пределах 57-113 мм, причем максимальная изменчивость характерна для западной части территории (г. Салехард), где отмечается наименьшая для территории сумма осадков, а минимальная межгодовая изменчивость – для восточной части (г. Новый Уренгой). Коэффициент вариации изменяется от 0,125 до 0,294.

Анализ временных рядов температуры воздуха и осадков показал также, что в них присутствует статистически значимый линейный тренд. Температура воздуха за весь период наблюдений на метеостанциях в среднем увеличивалась на $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ в год, причем в г. Новый Уренгой эта интенсивность выше всего — $0,067\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (рис. 6).

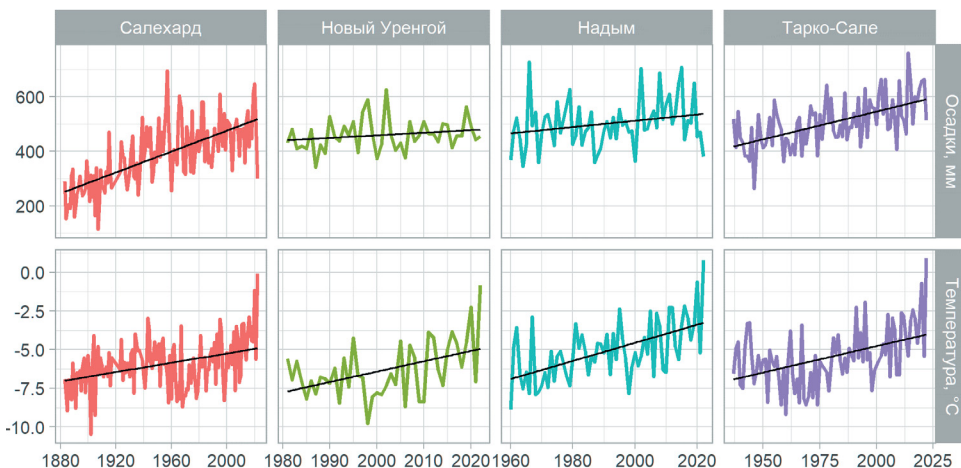


Рис. 6. Многолетние изменения среднегодовой температуры воздуха и суммы осадков по метеостанциям

Осадки увеличиваются на $1,51\text{ мм}/\text{год}$, интенсивнее всего в Тарко-Сале — на $2\text{ мм}/\text{год}$. Анализ t-критерия Стьюдента для рядов среднегодовых температур и осадков показал, что все тренды, наблюдаемые в данных, являются статистически значимыми.

Среднемаксимальные суточные суммы осадков, характерные для данной территории, достаточно устойчивы — от 27 до $29,8\text{ мм}/\text{сут}$. Наименьшая среднемноголетняя среднемаксимальная суточная сумма осадков наблюдалась на м/с Салехард, наибольшая — на м/с Тарко-Сале. Абсолютные максимальные суточные суммы осадков составляют: для м/с Салехард — $72,7\text{ мм}$ (1967), м/с Новый Уренгой — $58,1\text{ мм}$ (1998), м/с Надым — $67,6\text{ мм}$ (1966), м/с Тарко-Сале — 85 мм (1965). Все случаи выпадения максимального количества суточных осадков приурочены к летнему периоду (июль — август).

Для исследования структуры осадков были также проведены оценки годовых сумм осадков в виде дождя и снега. В отсутствии данных по измерениям дождей и снежного покрова анализ был проведен разделением сумм осадков по пороговому значению температуры воздуха $t = 0$. Анализ показал, что в среднем сумма осадков, выпадающих в виде дождей, на всех станциях больше, чем в виде снега — до 70% (рис. 7). Для дождей и снега также были оценены многолетние тренды за период наблюдений. Анализ

трендов показал, что все они статистически значимы на уровне 0,05%. Для дождей на всех станциях наблюдается положительный тренд вплоть до 1,3 мм/год. Для снега на всех станциях, кроме Нового Уренгоя, также наблюдается положительный тренд в размере от 0,5 до 1,7 мм/год. Для Нового Уренгоя этот тренд незначительно отрицательный и равен -0,26 мм/год.

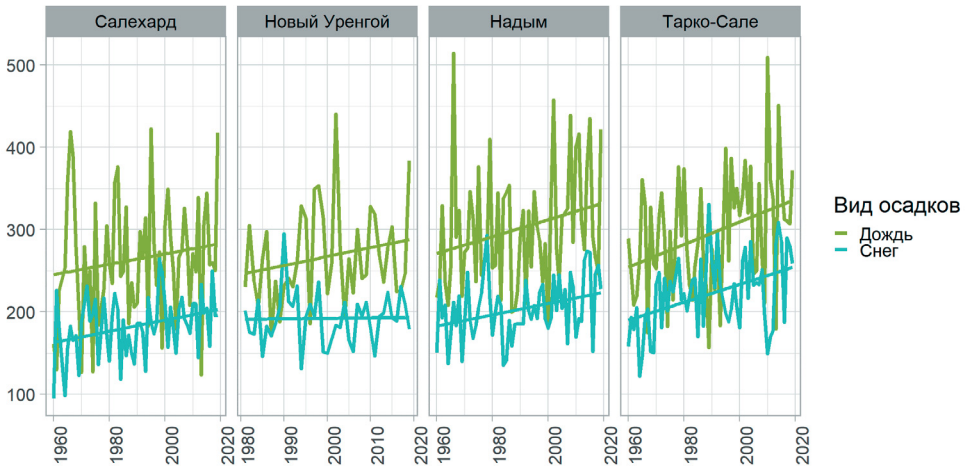


Рис. 7. Многолетние изменения годовой суммы осадков в зависимости от типа

Характеристика фоновое состояние криолитозоны составлена на основании результатов долгосрочного мониторинга глубины максимального сезонного оттаивания почвы на площадках CALM (<https://www2.gwu.edu/~calm/>). Площадки мониторинга расположены на территории метеостанций в городах Надыме и Новый Уренгой. Данные свидетельствуют о том, что с 1997-го по 2021 год глубина оттаивания увеличилась на 40% с 119 см по 196 см для метеостанции Надым и на 27% с 84 см до 107 см для метеостанции Новый Уренгой (рис. 8).

Гидрологические наблюдения в пределах южной части ЯНАО и непосредственно малых водосборов в настоящее время крайне ограничены. Среди модельных водосборов только на р. Седэ-Яха располагается гидрологический пост, в пяти километрах от впадения в р. Евояха около Нового Уренгоя. Гидрологический пост работает с 1985 г. по настоящее время. На основании материалов изысканий [10], посвященных водосбору р. Евояха, реке, притоком которой является р. Седэ-Яха, можно сказать, что исследуемые водосборы по классификации Зайкова принадлежат к Западносибирскому типу гидрологического режима с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время года. Для рек данного типа характерно преимущественно снеговое питание, талые воды составляют 65-80% годового стока рек, грунтовое питание играет незначительную роль из-за наличия многолетней мерзлоты.

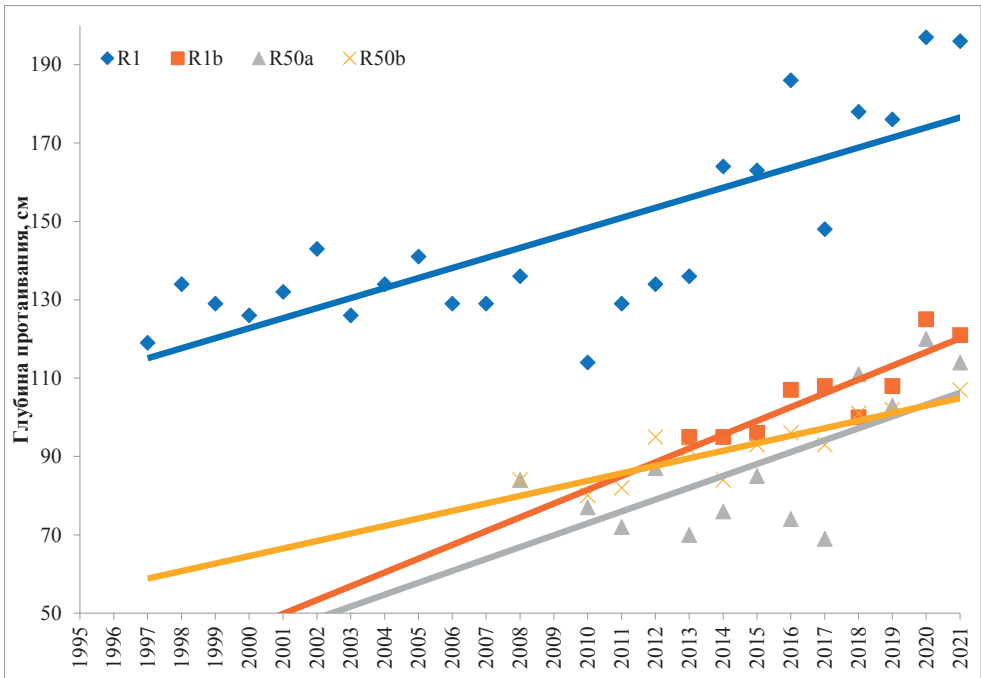


Рис. 8. Глубина сезонного оттаивания по данным скважин CALM.
 Примечание: R1, R1b – скважины на метеостанции Надым, R50a, R50b – скважины на метеостанции Новый Уренгой

В этих условиях организованные наблюдения являются исключительным источником информации о гидрологических процессах. В рамках наблюдений 2022 года был получен ряд наблюдений за температурой и уровнем воды, охватывающий период 21.09.2022 – 24.10.2022 гг. на модельном водосборе р. Васъёган в створах наблюдений 1 (верховья реки) и 2 (среднее течение реки). Данные были обработаны и совмещены с рядом наблюдений за атмосферными осадками на автоматической метеостанции Салехард, расположенной в 10 км к западу от створов наблюдений, для анализа реакции модельного водосбора на выпадение осадков (рис. 9).

Анализ совмещенных графиков уровней, температур и осадков показывает следующее. Температура воды имеет выраженный суточный ход, а также реагирует на поступление осадков в русловую сеть – это видно на графике с 22-23 сентября, когда температура медленно и продолжительно опускалась вслед за уровнем воды на фоне отсутствия осадков, а затем 9-11 октября после выпавших осадков уровень повысился, а температура понизилась. То же произошло и начиная с 19 октября, когда после продолжительных осадков и подъема паводковой волны температура стабильно снизилась.

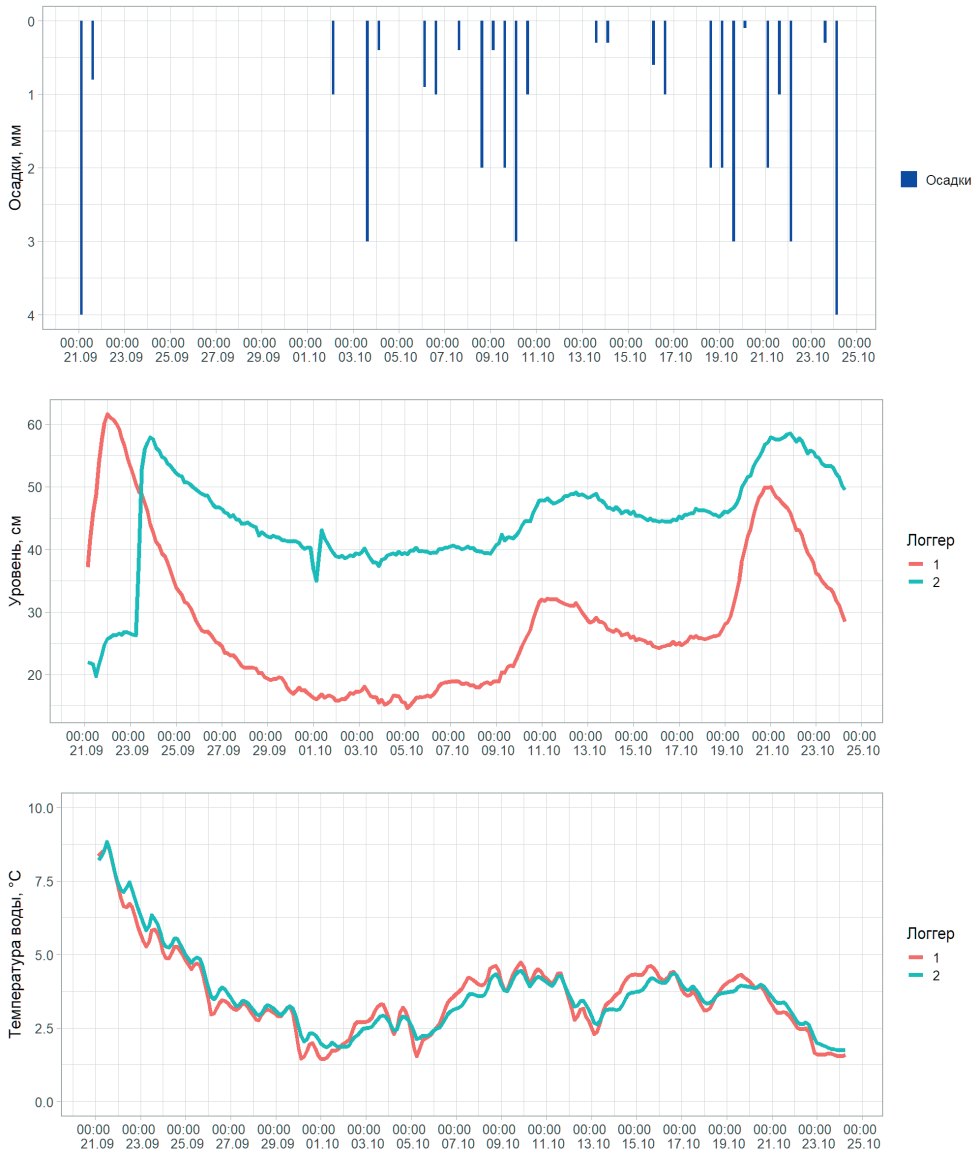


Рис. 9. Ход температуры, уровня воды и количества осадков на модельном водосборе р. Васъёган по двум створам 1 (верховья реки) и 2 (среднее течение реки)

Реакция уровня воды на выпадение осадков позволяет оценить стоко-регулирующую роль болот, торфяников и глубины сезонного оттаивания почвы на водосборе. Определенное количество осадков накапливается в болотно-торфяной емкости, прежде чем сток повысится в русловой сети. Это хорошо видно на двух графиках, которые получены по данным наблю-

дений за паводками 9-11 и 19-21 октября. Осадки, сформировавшие первый паводок, начались 1-2 октября, сформировавшие второй – 13-15 октября, что дает в итоге время концентрации водосбора величиной около 4-7 дней. Этот эффект будет в дальнейшем более детально уточнен. Скачок уровня, отмеченный на графике хода уровня, на створе 2 01.10.2022 связан, предположительно, с установлением заберегов на р. Васъеган в этот момент. Это подтверждает фото с фотоловушки, расположенной на участке.

По результатам фильтрования речной воды максимальные значения мутности были зафиксированы на р. Васъеган (в нижней части бассейна, у полигона ТКО) – 61,7 мг/л, р. Маханяд-Пусьяха – 148 мг/л и р. Евояха – 51,3 мг/л. Большая часть водотоков характеризуется небольшими значениями мутности воды до 10-15 мг/л.

По водородному показателю рН большая часть водотоков характеризуется нейтральными показателями рН (в пределах 6,5-7,5), исключения составляют нижняя станция мониторинга на модельном водосборе Васъеган (5,7) и нижняя станция мониторинга Евояха (6,2), где показатели рН относятся к слабокислым водам, что, вероятнее, всего связано с присутствием гумусовых кислот в почве и болотных водах, что в целом свойственно всей исследуемой территории.

Результаты измерений электропроводности по исследуемым водотокам свидетельствуют о том, что водотокам модельных водосборов свойственны малые значения удельной электропроводности (до 100 мкСм/см). Однако на р. Юнъяха значения электропроводности увеличиваются до 159 мкСм/см, что, возможно, связано с выходом коренных пород на водосборе.

По модельному водосбору «р. Васъеган» значения рН уменьшаются от верхней (8,8) к нижней (5,7) станции мониторинга. Обратная ситуация наблюдается для значений мутности воды, которая увеличивается от верхней станции к нижней с 5,12 мг/л до 61,7 мг/л, что связано с контрастной антропогенной нагрузкой в пределах водосбора: в верхнем течении отсутствует, в нижней части бассейна принимает максимальные значения (например, пересечение трассой Салехард-Надым). Величина относительной электропроводности и температуры воды на обеих станциях в целом однородна.

По модельному водосбору «р. Седэ-Яха» фиксируется аналогичное распределение параметров: однородность температуры воды и электропроводности воды; уменьшение показателя рН (с 7,5 до 6,2) и увеличение мутности воды (с 8 мг/л до 51,3 мг/л).

На контрастных по площади водосборах «р. Маханяд-Пусьяха» и «р. Выерьяха» наблюдаются контрастные значения удельной электропроводности, величины рН и мутности воды. Максимальны характеристики на модельном водосборе «р. Маханяд-Пусьяха». Мутность воды здесь составляет 148 мг/л против 11,1 мг/л на модельном водосборе «р. Выерьяха».

По удельной электропроводности значения выше на водосборе «р. Маханяд-Пусьяха» (89,7 мкСм/см), на водосборе «р. Выерьяха» значения в 3,5 раза ниже – 25,1 мкСм/см. Все вышеизложенные характеристики качества воды отображены в табл. 3.

Таблица 3. Физические характеристики вод рек ЯНАО по результатам обследования водотоков с 20-го по 24 сентября 2022 г.

Река	Дата	Координаты		<i>ae</i>	<i>pH</i>	<i>T</i>	Оптическая мутность, NTU	Весовая мутность, мг/л
		X	Y					
Верховье Васьегана	20.09.2022	66,535213	66,818416				5,77	5,12
Васьеган	20.09.2022	66,561965	66,718370	55,1	5,7	6,8	143,3	61,7
Маханяд-Пусьяха	22.09.2022	65,814124	71,023385	89,7	7,0	5,2	48,5	148
Выерьяха	22.09.2022	65,828946	71,288371	25,1	6,6	6,2	11,2	11,1
Танопча	21.09.2022	65,963193	68,951371	51,9	7,4	7,3	15,3	15,1
Юньяха	21.09.2022	66,277680	68,453521	159	7,5	8,4	5,48	5,11
Тюндья-хамал	21.09.2022	66,314746	68,149399	41,3	7,8	8,8	3,10	10,6
Седэ-Яха	24.09.2022	65,996069	75,728886	19,1	7,5	5,1	6,80	8,00
Евояха	24.09.2022	65,992665	77,455585	26,1	6,2	4,9	10,5	51,3
Хадыта	23.09.2022	65,462654	73,679971	32,5	7,2	3,9	27,43	12,3

В пробах донных отложений проанализирован гранулометрический состав методом ситового анализа в диапазоне фракций от 0,1 мм до 10 мм. Гранулометрический состав донных отложений исследуемых рек варьирует в диапазоне значений от гравия до тонких песчаных частиц. Пробы характеризуются преобладанием среднего и мелкого песка. На модельном водосборе «р. Васьеган» на верхней станции мониторинга средний диаметр донных отложений составил 0,29 мм с увеличением на нижней станции мониторинга до 0,59 мм. Связано это с уклонами русла и скоростями течения водного потока, которые выше на нижней станции мониторинга. Аналогичная ситуация наблюдается и для модельного водосбора «р. Седэ-Яха», где средний диаметр донных отложений увеличивается с 0,25 мм до 0,49 мм. Для модельных контрастных по площади водосборов «р. Маханяд-Пусьяха» и «р. Выерьяха» получены также контрастные средние диаметры донных отложений. На модельном водосборе «р. Маханяд-Пусьяха» значение среднего диаметра составляет 0,81 мм, а на «р. Выерьяха» – 0,29 мм. Данная закономерность также связана с морфометрическими характеристиками бассейна (коэффициент корреляции между средним диаметром и площадью водосбора составляет 0,81).

Заключение

Впервые на территории Ямало-Ненецкого автономного округа силами сотрудников ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова организованы стационарные гидрологические наблюдения на трех модельных водосборах, расположенных в южной части региона.

Региональный рекогносцировочный этап исследования включил в себя визуальный анализ космических снимков на южную территорию ЯНАО и маршрутный объезд вдоль автотрассы «Салехард – Надым – Новый Уренгой». Обследованная территория совпадает с южной границей распространения сплошной мерзлоты и границей между лесотундрой и тундрой, что обуславливает важность постановки исследований именно в этой части ЯНАО: все водосборы попадают на границу двух контрастных условий развития эрозионных процессов. Был обследован 41 водоток, протекающий по территории модельных водосборов, так и в пределах бассейнов рек Оби, Полуй, Надым, Пур. Получены уникальные данные о пространственной изменчивости физико-химических показателей воды в период меженной фазы водности.

В качестве модельных водосборов были выбраны р. Васъеган в бассейне Нижней Оби, два смежных водосбора Маханяд-Пусъяха и Выерьяха в бассейне Надыма и водосбор р. Седэ-Яха в бассейне р. Пур. Разработаны два типа стационарных полигонов для изучения эрозионных наблюдений: площадки наблюдений овражной эрозии и площадки наблюдений береговой эрозии. В пределах модельных водосборов установлены разработанные для задач исследования автономные мультипараметрические регистраторы температуры и уровня воды, а также станция контроля мутности, предназначенные для высокочастотного мониторинга в течение продолжительного времени гидрологических характеристик на реках криолитозоны. В данной статье приведены предварительные результаты, полученные в ходе работы датчиков на модельных водосборах. Тестовые результаты мониторинга были связаны также с обобщением данных о ландшафтных условиях развития эрозионных процессов и климатической обстановке в регионе, необходимых для запуска водно-эрозионной модели. Эти результаты, в частности, подтвердили актуальность задачи развития сети наблюдений за эрозией в условиях климата, так как анализ временных рядов температуры и осадков по постам Росгидромета показал статистически значимый линейный тренд. Получена оценка реакции водосбора на выпадение осадков в период осени 2022 года: для водосборов наблюдается растянутая во времени волна повышенного стока, и ей предшествует определенное количество накопленных в болотно-торфяной емкости осадков, прежде чем она проявится в русловой сети.

Проведенные исследования и организованные станции мониторинга направлены на создание массива гидрометеорологической информации, необходимой для развития комплексной системы мониторинга и прогнозирования водно-эрозионных процессов. Такая система, по предварительным оценкам, будет включать в себя: 1) систему сбора количественных данных о развитии процессов эрозии на природных полевых стационарах; 2) оценку фактических и прогнозных изменений факторов эрозии, в том числе сценарии изменений водного режима по результатам сценарных расчетов климатических моделей общей циркуляции атмосферы; 3) программное исполнение водно-эрозионной модели.

Результатом станет первая в России региональная комплексная водно-эрозионная модель прогнозирования опасных гидрологических процессов в условиях распространения многолетней мерзлоты. Подобная модель, верифицированная для модельных водосборов территории ЯНАО, имеет перспективы использования для любых хозяйственных объектов, расположенных в условиях развития многолетней мерзлоты и находящихся в зоне потенциальных рисков деформаций поверхностей за счет эрозионно-мерзлотных процессов.

Развитие системы моделирования и её объединение со сценарными климатическими оценками изменения водного режима позволит получить прогнозные оценки климатически обусловленных изменений водного стока и активизации процессов для различных территорий, расположенных в пределах модельных водосборов и в сходных условиях. Эти оценки являются инструментами долгосрочного прогнозирования и создания стратегии использования водных ресурсов и безопасности объектов хозяйственной инфраструктуры. На основе численного моделирования могут быть созданы алгоритмы прогнозирования процессов водной эрозии в условиях деградации многолетнемерзлых пород на территории ЯНАО с выбором эффективных вариантов защиты хозяйственной инфраструктуры.

Список источников

1. Ларченко Л.В., Колесников Р.А. Дифференциация социально-экономического развития арктических регионов России // *Инновации*. – 2017. – № 10 (228). – С. 69-75.
2. Познанин В.Л. Эрозионные процессы в криолитозоне // *Пространство и время*. – 2012. – № 7 (1). – С. 127–132.
3. Kolesnikov R. Ecological state of water bodies and their water protection zones within the boundaries of settlements of the Yamal peninsula // *Actual Problems of Ecology and Environmental Management (APEEM 2021)*. - Vol. 265 of E3S Web of Conferences. - EDP Sciences, 2021. - P. 02009.

4. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Бердников Н.М., Великин С.А., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Жданев О.В., Захаров А.А., Леопольд Я.К., Кузнецов М.Е., Малкова Г.В., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Ривкин Ф.М., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н., Устинова Е.В., Шеин А.Н. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. – 2022. – Т. 26. – № 4. – С. 3-18.
5. Чалов С.Р., Морейдо В.М., Прокопьева К.Н., Ефимов В.А. Влияние береговых едомных обнажений на сток наносов арктических рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2022. – Т. 4, № 2. – С. 141-157.
6. Шишкин М.А., Файбусович Я.Э., Шкарубо С.И., Назаров Д.В., Абакумова Л.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард. Объяснительная записка // Картографические изд., – СПб. – 2014. – 396 с.
7. Шишкин М.А., Файбусович Я.Э., Шкарубо С.И., Назаров Д.В., Абакумова Л.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-43 – Новый уренгой. Объяснительная записка // Картографические изд., – СПб. – 2015. – 320 с.
8. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. Коллективная монография. – М.: Почвен-е изд. – 2014. – 768 с.
9. Zanaga D. ESA WorldCover 10 m 2020 v100 // Meteosat Second Generation Evapotranspiration (MET). 2021.
10. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) «Автозаправочная станция Ново-Уренгойского ЛПУМГ» 50/58-422-494-2022. ОВОС Заказчик - ООО «Газпром трансгаз Сургут».

Сведения об авторах

Иванов Виктор Алексеевич, гидролог, аспирант кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Автор и соавтор 7 научных статей. Область научных интересов: речные наносы, косвенные методы определения мутности, водная эрозия, береговая эрозия.

Морейдо Всеволод Михайлович, гидролог, кандидат географических наук, заведующий лабораторией гидроинформатики Института водных проблем РАН (Москва). Является специалистом по исследова-

нию и математическому моделированию процессов формирования стока воды и речных наносов, влиянию изменения климата на речной сток и прогнозированию его последствий. Автор более 50 статей в российских и международных научных журналах.

Прокопьева Кристина Николаевна, гидролог, магистр кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Автор и соавтор 12 научных статей. Область научных интересов: гидрология рек, русловые процессы, речные наносы, дельты рек, спутниковые снимки.

Тарбеева Анна Михайловна, геоморфолог, работает в районах распространения многолетнемерзлых пород (Центральная и Северная Якутия, Чукотка, Ямал, Аляска), кандидат географических наук, научный сотрудник географического факультета МГУ. Автор и соавтор более 100 научных статей, в том числе 2 монографий и 2 атласов. Область научных интересов: флювиальная геоморфология, экзогенные процессы.

Колесников Роман Александрович, ямальский исследователь, эколог-практик, специалист в области охраны окружающей среды, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник сектора геоэкологии ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Является экспертом Национального арктического научно-образовательного консорциума, экспертом ситуационного центра сферы туризма Российского государственного университета туризма и сервиса, член Российского отделения Международной ассоциации ландшафтной экологии (IALE-Russia). Общественный инспектор по охране окружающей среды Ямало-Ненецкого автономного округа. Автор и соавтор более 70 научных работ, в том числе 3 монографий. Область научных интересов: геоэкология, почвоведение, рекреационное природопользование.

Чалов Сергей Романович, гидролог, доктор географических наук, заведующий НИЛ Лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Является постоянным членом Русского Географического общества, член президума World Association of Soil and Water Conservation (WASWAC). С 2015 года – вице-президент и секретарь Комиссии по Континентальной Эрозии (International commission for Continental Erosion, ICCE) Международной Гидрологической Ассоциации (International Association of Hydrological Sciences, IAHS), президума Межвузовского научно-координационного совета по проблемам эрозионных и русловых процессов при МГУ имени М.В. Ломоносова. Автор и соавтор более 250 научных статей, в том числе 13 книг. Область научных интересов: гидрология рек, русловые процессы, гидроэкология, речные экосистемы.

Участие авторов

Иванов В.А. – сбор и обработка полевых материалов, анализ климатических и гидрологических показателей, написание текста статьи.

Морейдо В.М. – сбор и обработка полевых материалов, анализ климатических и гидрологических показателей, составление картографических материалов, написание текста статьи.

Прокопьева К.Н. – сбор и обработка полевых материалов, анализ гидрологических показателей, изучение эрозионных процессов, работа с текстом статьи.

Тарбеева А.М. – сбор и обработка полевых материалов, анализ гидрологических показателей, изучение эрозионных процессов, построение цифровой модели рельефа, работа с текстом статьи.

Колесников Р.А. – организация проведения полевых работ, сбор и обработка полевых материалов, написание текста статьи.

Чалов С.Р. – сбор и обработка полевых материалов, анализ климатических и гидрологических показателей, изучение эрозионных процессов, написание текста статьи.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 11.04.2023 г., принята к публикации 29.09.2023 г.

The article was submitted on April 11, 2023, accepted for publication on September 29, 2023.