

УДК 504.058

Гидрологическая система р. Ирелях и ее взаимодействие с промышленно-коммунальной инфраструктурой Мирнинского района, Республика Саха (Якутия)

И. И. Алексеев*, Н. И. Тананаев, А. А. Короткий

*Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета
им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия;
e-mail: ivan1989alex@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7087-5168>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
09.01.2025;

получена
после доработки
10.02.2025;

принята
к публикации
13.02.2025

Ключевые слова:

река Ирелях, гидрограф,
гидропост, водоток,
водосбор,
кумулятивный график,
весеннее половодье,
осенний паводок,
летний межень

Добыча полезных ископаемых (золото, алмазы или другие руды) открытым способом оказывает глубокое и многоаспектное негативное воздействие на водные экосистемы. Степень антропогенного преобразования водных экосистем зависит от масштаба воздействия, которое оценивается через водохозяйственные показатели, такие как объемы забора воды, целевое назначение водопользования, сброс сточных вод и их качество, а также развитие оборотного водоснабжения. В работе рассмотрены особенности техногенной трансформации гидрологической системы р. Ирелях – единственного источника хозяйственно-питьевого и производственного водоснабжения г. Мирный, удовлетворяющего также технические нужды алмазодобывающего предприятия. Проанализировано возможное негативное влияние гидрологических процессов на инженерные сооружения. Выполнено сравнение гидрологических характеристик р. Ирелях до и во время техногенного воздействия, рассмотрены три основных техногенных фактора перераспределения стока: сработка Иреляхского водохранилища, сброс сточной воды канализационно-очистой станции г. Мирный и забор воды для драг прииска "Ирелях" Мирнинского ГОКа. Дана количественная оценка потерь воды на испарение с поверхности Иреляхского водохранилища и дражных полигонов в нижнем течении реки. Рассчитаны современные максимальные обеспеченные расходы воды дождевых паводков и пределы неопределенности данной оценки. Определены подходы к прогнозированию параметров гидрологической системы р. Ирелях в климате будущего.

Для цитирования

Алексеев И. И. и др. Гидрологическая система р. Ирелях и ее взаимодействие с промышленно-коммунальной инфраструктурой Мирнинского района, Республика Саха (Якутия). Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 1. С. 103–118. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-1-103-118>.

Hydrological system of the Irelyakh River and its interaction with industrial and municipal infrastructure of the Mirny district, Republic of Sakha (Yakutia)

Ivan I. Alekseev*, Nikita I. Tananaev, Alexander A. Korotky

*Institute of Natural Studies, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia;
e-mail: ivan1989alex@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7087-5168>

Article info

Received
09.01.2025;

received
in revised form
10.02.2025;

accepted
13.02.2025

Key words:

the Irelyakh River,
hydrograph, gauging
station, watercourse,
catchment,
cumulative schedule,
spring flood, fall flood,
summer low water

Abstract

Open-pit mining (gold, diamonds or other ores) has a profound and multidimensional negative impact on aquatic ecosystems. The degree of anthropogenic transformation of aquatic ecosystems depends on the scale of impact assessed through water management indicators, such as the volume of water withdrawal, purpose of water use, wastewater discharge and its quality, as well as the development of recycled water supply. The paper considers the peculiarities of technogenic transformation of the hydrological system of the Irelyakh River, the only source of drinking and industrial water supply in Mirny, which also meets the technical needs of the diamond mining enterprise, as well as the possible negative impact of hydrological processes on engineering structures. A comparison of the hydrological characteristics of the Irelyakh River before and during the technological process has been made. The hydrological characteristics of the Irelyakh River before and during the anthropogenic impact have been compared, and three main anthropogenic factors of flow redistribution are considered: the Irelyakh reservoir drawdown, wastewater discharge by the sewage treatment plant in Mirny, and water intake for dredges of the Irelyakh mine by Mirny Mining and Processing Plant. Quantitative assessment of water losses for evaporation from the surface of the Irelyakh reservoir and dredge dumps in the lower reaches of the river has been given; modern maximum secured water discharge of rainfall floods has been calculated using standard methods and approaches to their forecasting in the future climate have been determined.

For citation

Alekseev, I. I. et al. 2025. Hydrological system of the Irelyakh River and its interaction with industrial and municipal infrastructure of the Mirny district, Republic of Sakha (Yakutia). *Vestnik of MSTU*, 28(1), pp. 103–118. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-1-103-118>.

Введение

С обнаружением и промышленным освоением россыпных алмазов на р. Ирелях связано преобразование естественного водного режима реки и прилегающей водосборной территории, а также начало научного изучения этого водного объекта как части бассейна р. Вилюй (*Ксенофонтова и др., 2019; Наумова и др., 2013; Тихонова и др., 2024; Портыненко, 2021*) и как территории расположения алмазной промышленности (*Мышляков и др., 2015; Янников и др., 2024; Долгих, 2021*). Детально исследованы особенности гидрохимии и гидробиологии среднего и нижнего течения р. Ирелях, связанные с промышленным освоением. По данным гидрохимических исследований, для селитровой зоны характерно загрязнение реки органическими веществами (химическое потребление кислорода, перманганатная окисляемость), в промышленной зоне преобладают взвешенные вещества и ионы аммония. Развитие алмазодобывающей промышленности привело к изменению гидрохимического режима р. Ирелях: увеличилось содержание хлоридов, ионов натрия и общей минерализации из-за сброса минерализованных карьерных вод (*Наумова и др., 2013*). В 2018 г. вследствие дождевого паводка редкой повторяемости произошел прорыв дамб дражных полигонов на р. Ирелях с прорывом загрязненных вод в реках Малая Ботуобия, Вилюй, и далее в р. Лена. После аварийного прорыва дражного полигона в 2018 г. качество воды ухудшилось по органолептическим показателям (цветность до 20 ПДК, мутность до 61 ПДК), а также по БПК₅ (до 3,9 ПДК) и ХПК (до 4,5 ПДК) (*Ксенофонтова и др., 2019*).

Гидробиологические исследования 2018 г. показали низкое видовое разнообразие водорослей (от 6 до 12 видов на участках р. Ирелях), однако к 2020 г. их количество увеличилось до 25 видов, что свидетельствует о постепенном восстановлении экосистемы после аварии, поскольку фитопланктон и фитоперифитон служат биоиндикаторами состояния водной среды (*Николаева и др., 2023*).

Гидрология реки рассматривалась ранее только как фон для изучения вопросов региональной гидрогеологии или гидрохимии. Гидрологические наблюдения на р. Ирелях начали вести с 1956 г. параллельно с геологическими экспедициями, проводившими поиск и разведку месторождений алмазов. Такие наблюдения имели временный характер, поскольку требовалось за короткий период (3–5 лет) собрать гидрологические данные для промышленных нужд. В период с 1957 по 1962 гг. русло р. Ирелях претерпело значимые антропогенные изменения в связи с регулированием стока для водохранилища и алмазных драг, водный режим также был трансформирован.

Промышленное освоение рек и их водосборов опирается на сведения о гидрологическом режиме, который определяет пределы техногенного преобразования естественных гидрологических систем. Взаимодействие речной системы и промышленных объектов происходит не только в форме использования водных ресурсов и инженерного влияния на водный баланс реки, но и в форме воздействия водотока на промышленные сооружения, например, при затоплении территории или иных проявлениях негативного воздействия речных вод. Кроме того, регулирование стока приводит к изменению среды обитания для многих видов, нарушая их жизненные циклы. Наименее адаптированные к изменениям гидрологического режима виды могут исчезнуть. Загрязнение водоемов вызывает изменение химического состава воды, что также негативно сказывается на обитателях водоемов.

Таким образом, комплексная оценка взаимодействия гидрологической системы р. Ирелях и промышленной инфраструктуры требует информации о гидрологическом режиме реки, который остается слабо исследованным. Несмотря на значимость гидрологических процессов для устойчивого функционирования водохозяйственной системы р. Ирелях, на данный момент практически полностью отсутствуют данные наблюдений и других специализированных исследований.

Целью исследования является количественная оценка современных параметров гидрологической системы р. Ирелях, а также установление особенностей ее взаимодействия с техногенными объектами в условиях интенсивного промышленного освоения водосбора и русла реки.

Район и объект исследования

Объектом исследования является река Ирелях (Иирэлээх), расположенная в Мирнинском районе Республики Саха (Якутия), где в среднем ее течении построен г. Мирный (рис. 1). Река берет начало на высоте 395 м, протекает между Вилюйским и Приленским плато в направлении с запада на восток и впадает в р. Малая Ботуобия с левой стороны. Общая протяженность реки 112 км, площадь водосбора 829 км². Ирелях относится к рекам со снеговым питанием, характеризуется высоким весенним половодьем и низкой летне-осенней меженью, нередко прерываемой дождевыми паводками. Весеннее половодье начинается в конце апреля – начале мая, с началом интенсивного снеготаяния. Расходы воды достигают 10–15 м³/с, начинается заполнение Иреляхского водохранилища и перелив воды через гребень водосброса. Максимальные расходы половодья приходятся на 15–25 мая, иногда на начало июня. Летне-осенняя межень наступает в конце июня – начале июля, меженный сток (июль – октябрь), как правило, составляет от 1 до 10 % от годового. В отдельные дождливые годы наблюдается прохождение значительных дождевых паводков, и доля летнего стока увеличивается. Осенью после перехода температуры воздуха через 0 °С наблюдается резкое уменьшение уровней и расходов воды (*Зелинская и др., 2009*). Ледовые явления отмечаются со второй половины сентября, когда появляются первые забереги. Ледяной покров устанавливается в октябре, сначала на притоках, затем на основной реке. Зимой (ноябрь – апрель) естественный сток р. Ирелях полностью

прекращается в результате замерзания, что происходит в конце ноября – начале декабря. Ледостав продолжается по апрель включительно. Толщина льда в районе плотины Иреляхского водохранилища и на плесах составляет 0,85 м, местами в результате образования наледей толщина льда достигает 1,7 м¹.

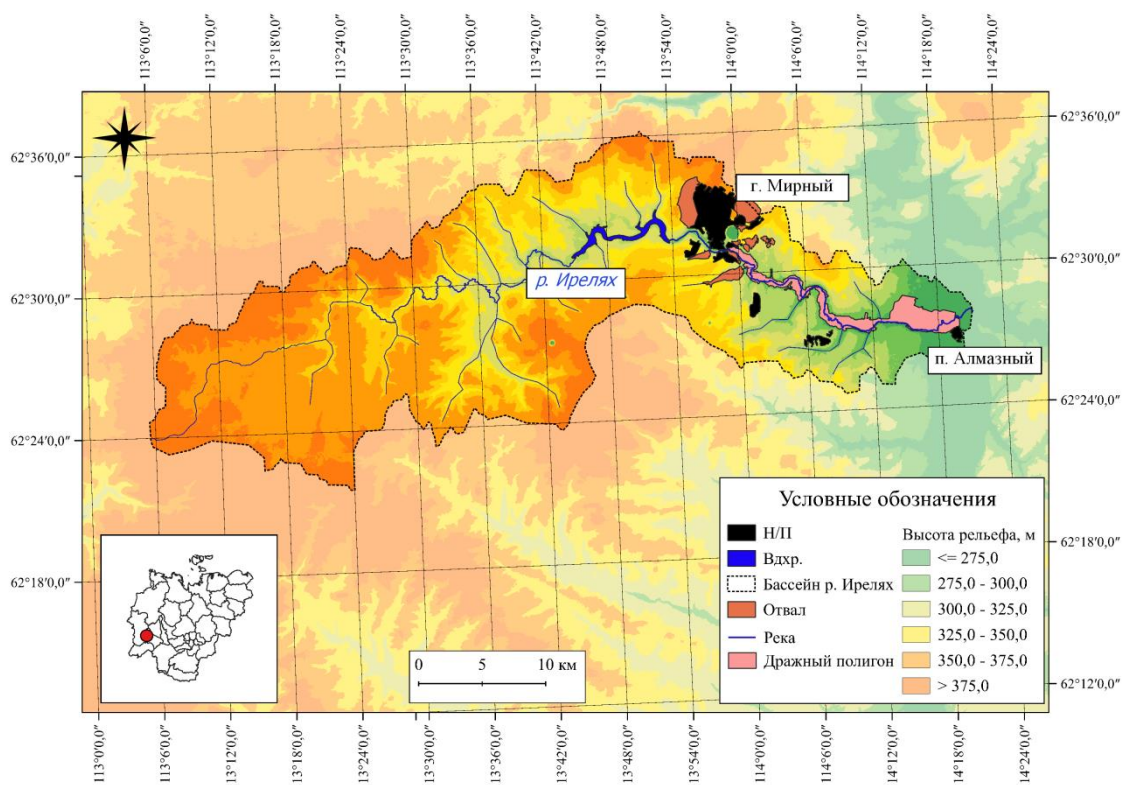


Рис. 1. Карта-схема водосборной площади р. Ирелях. Автор: Алексеев И. И.
Fig. 1. Location map of the Irelakh River catchment area. Author: Alekseev I. I

Долина реки шириной до 4,5 км имеет в основном корытообразную форму, выработанную в осадочных и изверженных породах палеозойского и мезозойского возраста. Русло реки сильно меандрирует по всей длине. В среднем течении река зарегулирована водохранилищем, ниже которой русло полностью преобразовано деятельностью драг (рис. 1).

История изучения гидрологического режима р. Ирелях начинается в 1956 г., когда был основан первый гидрологический пост р. Ирелях – пос. Мирный. В состав наблюдений входили измерения уровня, температуры и расхода воды, определялись гидрохимические показатели, изучался ледовый режим. В сентябре 1957 г. в связи с началом строительства плотины в 5,6 км от устья реки открывается еще один гидропост, а к 1958 г. на реке уже насчитывается пять гидропостов. Посты располагались в следующем порядке: первый пост – в 38,7 км от устья в верхнем бьефе водохранилища; второй – в 30,2 км от устья; третий – в пос. Мирный, где в районе водпоста река была зарегулирована четырьмя водоудержательными плотинами; четвертый – в 5,6 км от устья; пятый – в 2,7 км от устья, он работал только с мая по июль 1958 г. В этот период была построена временная плотина в створе первого гидропоста, а к сентябрю 1958 г. Иреляхское водохранилище уже было заполнено водой. В 1959 г. все гидропосты были закрыты; гидропост, расположенный в пос. Мирный, был перенесен на 6 км выше по течению, где проработал еще три года и также закрылся².

Материалы и методы исследования

В работе использованы данные гидрологических наблюдений на постах Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), опубликованные в Автоматизированной информационной системе государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО, URL: <https://gmvo.skniivh.ru/>), а также собственные результаты гидрологических исследований, полученные в 2024 г. Полевые исследования включали натурные обследования, разбивку гидрологических створов,

¹ Гидрологический ежегодник. 1959 г. Л. : Гидрометеиздат, 1963. Т. 8. Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Вып. О-7. Бассейны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского до р. Колыма. Т. 8 / под ред. А. И. Мосаловой, А. А. Афанасьева. 228 с.

² Там же.

нивелировку морфостворов, промерные работы, а также измерение расхода воды в ключевых точках по методу "скорость – площадь" (Клименко, 2021) с использованием гидрометрической вертушки ИСВП-ГР-21М1. Всего измерены расходы воды по 7 створам, расположение которых показано на рис. 2. Используются также архивные данные Якутского УГМС³, Ленского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов (Ленское БВУ Росводресурсов), фондовые материалы Мирнинского НГОК АК "АЛРОСА", ООО "ПТВС", ООО "ИТЭЛЬ".

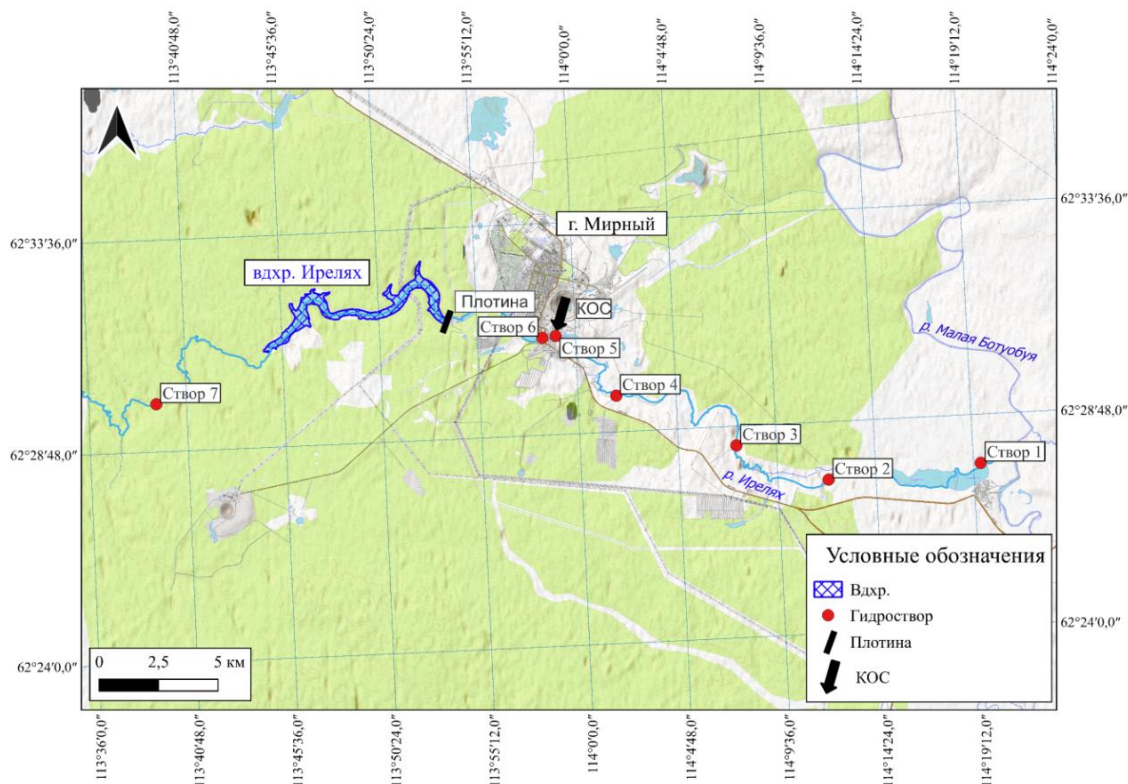


Рис. 2. Карта-схема расположения на р. Ирелях гидрологических створов, в которых проводились наблюдения в 2024 г. Источник: URL: <https://qms.nextgis.com/geoservices/4195/>

Fig. 2. Location map of hydrological sites on the Irelakh River where observations were made in 2024. Source: URL: <https://qms.nextgis.com/geoservices/4195/>

Гидрологические расчеты выполнены в соответствии с действующими нормами СП 33-101-2003 "Определение основных расчетных гидрологических характеристик"⁴ с привлечением справочных сведений, приведенных в Методических рекомендациях по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений⁵ и недействующих на данный момент СНиП 2.01.14-83 "Определение расчетных гидрологических характеристик"⁶. В расчетах максимального расхода дождевых паводков использованы формулы типа I и II (эмпирические редуцированные) при наличии и отсутствии рек-аналогов, для подготовки исходных данных использовалась программа "Гидрорасчеты". Расчет испаряемости выполнен по формуле Н. Н. Иванова без учета скорости ветра, примененной к среднедекадным значениям температуры и относительной влажности воздуха, как это сделано в работах (Поддубский, 2015; Семенова, 2019).

Результаты исследований

История техногенного преобразования водного стока р. Ирелях

В промышленном освоении и преобразовании естественной гидрологической системы р. Ирелях выделяется три этапа.

³ Гидрологический ежегодник. 1959 г. Л.: Гидрометеиздат, 1963. Т. 8. Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Вып. О-7. Бассейны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского до р. Колыма. Т. 8 / под ред. А. И. Мосаловой, А. А. Афанасьева. 228 с.

⁴ СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. С. 73.

⁵ Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Нестор-История, 2009. С. 193.

⁶ СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой СССР. 1985. С. 36.

Первый этап соответствует периоду естественного русла – до 1956 г. включительно; его характеризуют данные наблюдений 1956 г. – единственного года, когда состояние реки еще было естественным, эти данные принимаются как фоновые.

Второй этап – период строительства плотин для водохранилища и алмазных драг (1957–1958 гг.). За эти два года, начиная со среднего течения р. Ирелях и до ее устья, русло реки было зарегулировано водоподъемными плотинами и временной плотиной Иреляхского водохранилища, что повлияло на водный режим водотока (рис. 3).

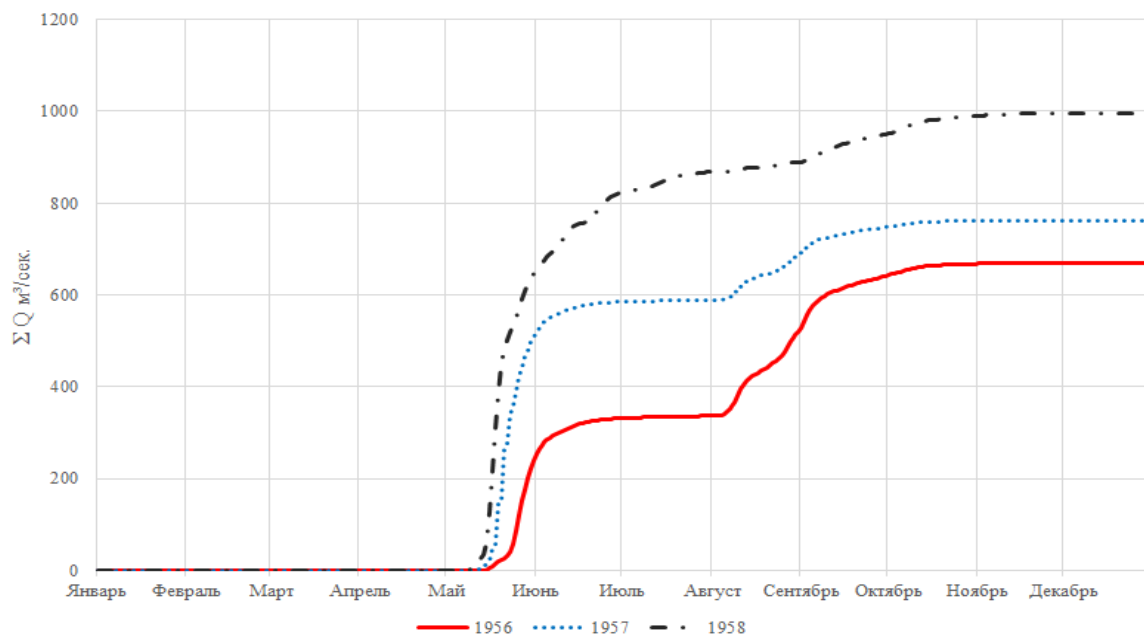


Рис. 3. Кумулятивный график суточных расходов воды на гидрологических постах р. Ирелях – пос. Мирный в 1956–1958 гг.

Fig. 3. Cumulative graph of daily water discharge of the Irelyakh River at Mirny settlement in 1956–1958

Годовой объем стока р. Ирелях в 1956–1958 гг. заметно различается, однако это связано, вероятно, с разной водностью лет. Гидрологические наблюдения в Республики Саха (Якутии) в конце 1950-х гг. были редки, однако на постах в западной и северо-западной Якутии, по которым данные доступны: Вилюй – Сунтар, Марха – Чумпурук, Оленек – Оленек, Малая Куонамка – Джалинда, годы по водности располагались в той же последовательности, что и на рис. 3; 1956 г. был наиболее маловодным.

В 1956 г. весеннее половодье началось во второй половине мая, было невысоким, сменилось летней меженью, которая продолжалась до первой декады августа. Дождевые паводки наблюдались на реке до первой декады сентября и составили около половины суммарного годового стока. С конца ноября до начала мая сток прекращается в результате перемерзания. В 1957–1958 гг. отмечается более раннее начало половодья, увеличение объема стока весеннего периода и снижение вклада дождевых паводков. Можно предположить, что часть пиков дождевых паводков в эти годы была срезана накоплением воды за временной плотиной. Гидроузел на реке Ирелях был введен в эксплуатацию 30 сентября 1964 г.

Третий этап (с 1959 г. по настоящее время) характеризуется наиболее интенсивным влиянием промышленного освоения на водный режим реки. В 1959 г. силами самоуправления "Драгстроймонтаж" началось строительство алмазных драг, уже в 1960 г. вступила в строй драга № 201, годом позже начала промывку песков драга № 202 (Вечерин, 1968). После продолжительного перерыва в 2004 г. была введена в эксплуатацию драга № 203 обогатительного комплекса Мирнинско-Нюрбинского ГОКа АК "АЛРОСА" (МНГОК АК "АЛРОСА")⁷. В результате работы драг морфология русла р. Ирелях на участке от плотины Иреляхского водохранилища до устья полностью трансформирована и представляет собой эксплуатируемые в период открытой воды дражные полигоны, охватывающие всю речную долину (русло, пойму и террасы). Дражные полигоны фактически являются мелкими водохранилищами, на которых работают драги прииска "Ирелях" МНГОКа. Таким образом, сток р. Ирелях уже более 60 лет зарегулирован в среднем и нижнем течении гидротехническими сооружениями различного назначения, а река в связи с антропогенным воздействием потеряла первоначальный облик (Сафронов и др., 2009).

⁷ Министерство инноваций, цифрового развития и инфокоммуникационных технологий РС(Я) ГАУ РС(Я) // Редакция газеты "Мирнинский рабочий". 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://mirrab.ru/aktualnye-temy/lyudi-alrosa/drage-203-20-let/> (11.11.2024).

Современная структура водохозяйственной системы р. Ирелях

На современном этапе освоения р. Ирелях – водохозяйственная система, в которой речной сток зарегулирован гидротехническими сооружениями, отводится для нужд водопользователей и возвращается в русло, извлекается из водного баланса в связи с дополнительным испарением с поверхности искусственных водоемов. Степень трансформации естественного состояния реки определяется уровнем и интенсивностью антропогенных воздействий, которые оцениваются через призму водохозяйственных показателей: количество забранных вод, целевые виды использования и доли изъятия водных ресурсов, объемы сброса сточных вод и др. (Рыбкина, 2023).

Водоснабжение промышленно-коммунальной инфраструктуры потребовало регулирования естественного стока р. Ирелях. В настоящее время водный режим реки определяется графиком работы Иреляхского гидроузла (рис. 4). Полезный объем Иреляхского водохранилища составляет 15,3 млн м³ при нормальном подпорном уровне (НПУ) 293,63 м. Основной период аккумуляции – первая половина мая, когда уровень воды поднимается до отметок выше НПУ, после чего наступает длительная фаза сработки с возможностью "срезки" и аккумуляции воды отдельных дождевых паводков (рис. 4). Гидроузел был построен по Принципу I СП 25.13330.2020⁸ (с сохранением мерзлых грунтов в основании), что привело со временем к оттайке грунтового основания и переходу на принцип работы с талым основанием (Долгих, 2021); наблюдается фильтрация под основанием плотины с интенсивностью 1 000 м³/ч.

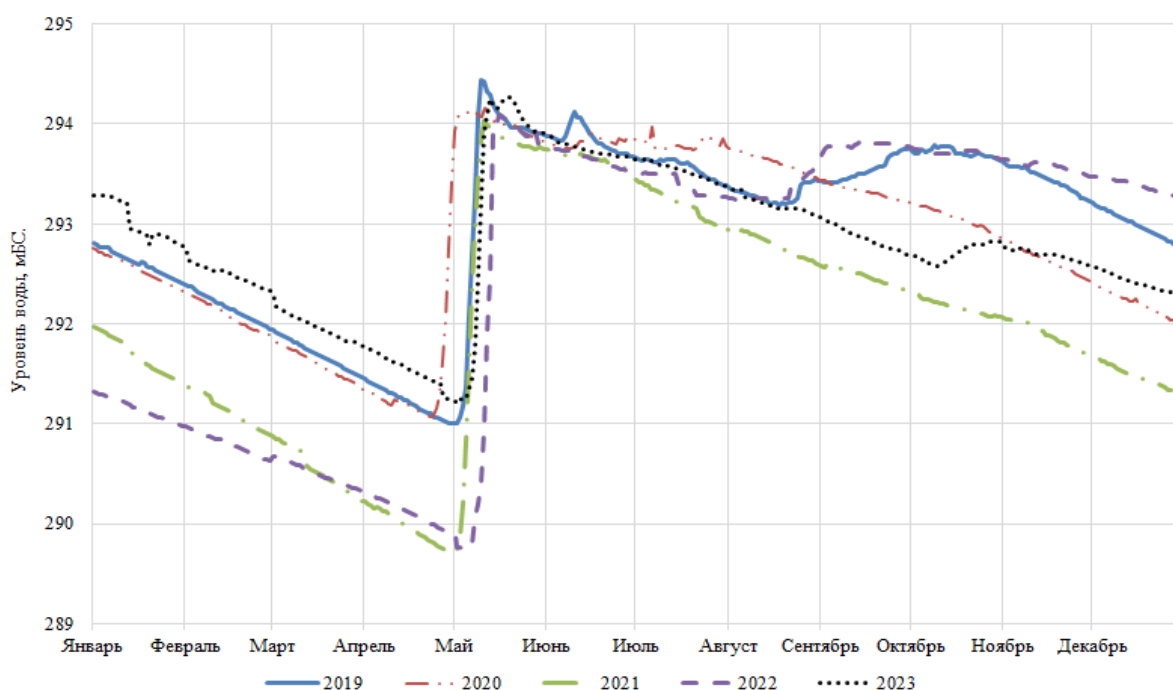


Рис. 4. Режим работы Иреляхского водохранилища в разные годы

Fig. 4. Operation modes of the Irelyakh reservoir in different years

Весеннее половодье на р. Ирелях проходят в конце апреля – начале мая, среднегодовой объем стока весеннего половодья равен примерно 54 млн м³ (90 % от среднегодового стока). Значительный объем половодья стока идет на заполнение водохранилища либо проходит транзитом через левобережный водосброс. В зимний период происходит сработка водохранилища для удовлетворения нужд водопользователей, в первую очередь – для коммунально-питьевого водоснабжения потребителей г. Мирный. Централизованное водоснабжение на территории муниципального образования г. Мирный осуществляет единственная ресурсоснабжающая организация ООО "ПТВС", которая осуществляет забор воды из Иреляхского водохранилища⁹. Объем водозабора показан на рис. 5, а. Годовой объем водозабора в среднем составляет 6,5 млн м³, среднесуточный отбор – 17 800 м³/сут, что соответствует расходу 0,206 м³/с.

⁸ СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659326>.

⁹ Схема водоснабжения и водоотведения муниципального образования "Город Мирный" Мирнинский район на период с 2023 года до 2027 года (Актуализация на 2024 год). ООО "Объединение энергоменеджмента". [Электронный ресурс]. URL: <https://xn----8sba3afqixm5b9c.xn--p1ai/administratsiya-goroda/%D0%A1%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0%20%D0%92%D0%A1%20%D0%B8%20%D0%92%D0%9E%20%D0%9C%D0%9E%20%D0%93%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%20%D0%9C%D0%B8%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%BD%D0%B0%202024%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4.pdf> (15.11.2024).

ООО "ПТВС" также производит сброс очищенных вод в 2,9 км ниже гидроузла, в районе обогатительной фабрики № 5; максимальные сбросы приходятся на зимний период, а в летнюю межень сброс сточных вод уменьшается (рис. 5, б). Объем годового сброса за 2020 г. составил 4,9 млн м³, а за 2021 г. – 4,2 млн м³. Таким образом, потери на сети составляют около 30 %, что примерно соответствует средним федеральным значениям. Сбрасываемые воды не очищаются нормативно. Исследования качества сбрасываемых сточных вод, проведенные сотрудниками учебно-научной лаборатории "Комплексного анализа техногенных нарушений среды" при Политехническом институте (филиале) СВФУ им. М. К. Аммосова, показали превышение допустимых норм следующих показателей: БПК – на 87 %, взвешенных веществ – на 66,5 %, общего фосфора – 180 % и азота – на 72 % (Бибихов и др. 2024), что характерно для коммунальных стоков.

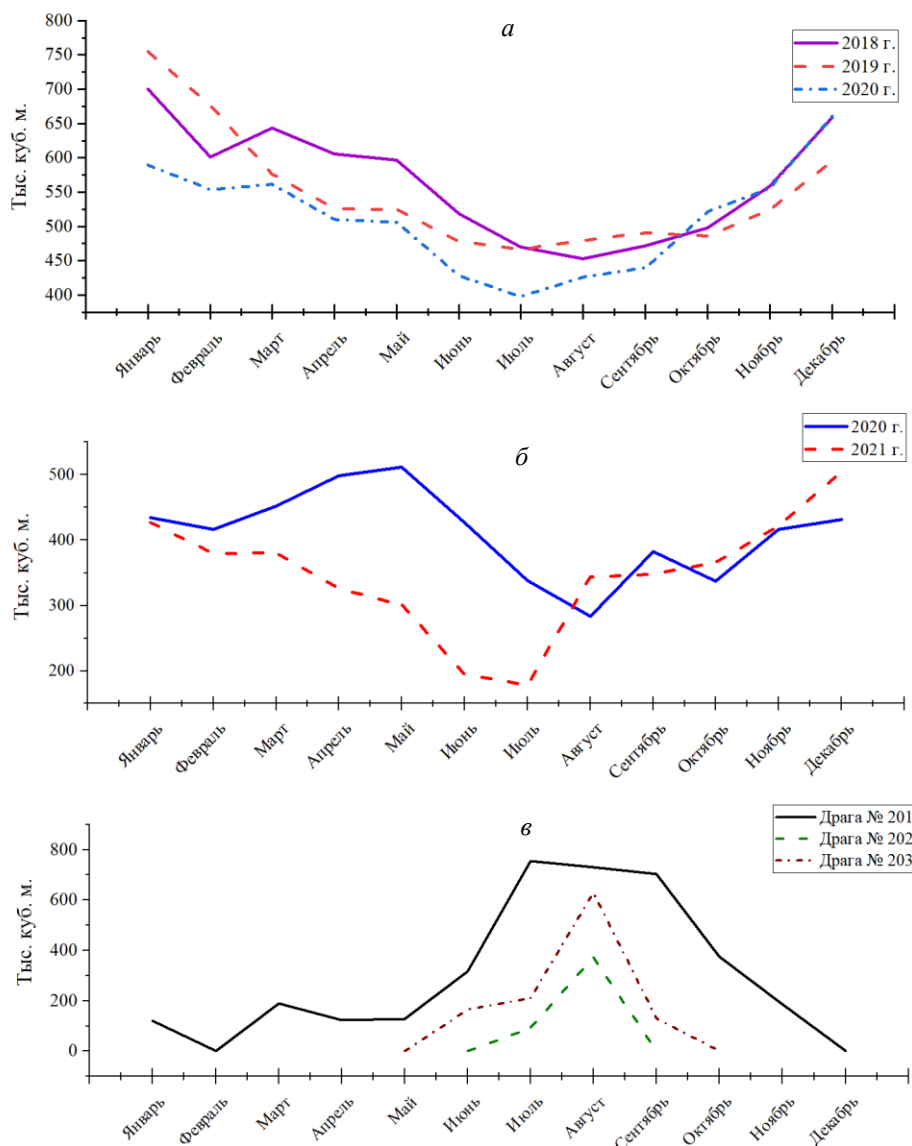


Рис. 5. График объема забора и сброса воды на р. Ирелях:
 а – объем забора воды из водохранилища; б – объем сброса сточной воды канализационно-очистной станции (КОС); в – объем воды, используемой драгами

Fig. 5. Graph of intake and discharge water volume on the Irelyakh River:
 а – volume of water intake from the reservoir; б – volume of wastewater discharge by the sewage treatment plant; в – volume of water used by dredges

Ниже участка сброса сточных вод производится отвлечение стока р. Ирелях для поддержания уровня воды в котлованах алмазодобывающих драг Мирнинского НГОК. Объемы забранной воды за 2022 г. в разбивке по месяцам представлены на рис. 5, в. Из трех имеющихся драг наибольшее потребление воды имеет драга № 201. Основной объем воды отводится в период открытого русла, когда меженный сток, как правило, крайне незначителен. Максимальный забор воды происходит в период летне-осенней межени

(пик приходится на август), когда интенсивно работают все три драги. Общий объем забранной воды трех драг с июня по сентябрь составил 4,1 млн м³, что близко к годовому объему сброса КОС.

Таким образом, водный сток р. Ирелях подвергается антропогенной трансформации под влиянием трех факторов (рис. 6): (1) годовой отбор воды из Иреляхского водохранилища: 6,5 млн м³; (2) сброс очищенной сточной воды через КОС г. Мирный: 4,6 млн м³, а также потери на сети ЖКХ; (3) отвлечение речных вод для поддержания условий работы драг: 5,2 млн м³. В результате сброса сточных вод в нижнем течении реки отмечается подрусловый сток, в связи с чем в устьевой части реки наблюдаются наледи.

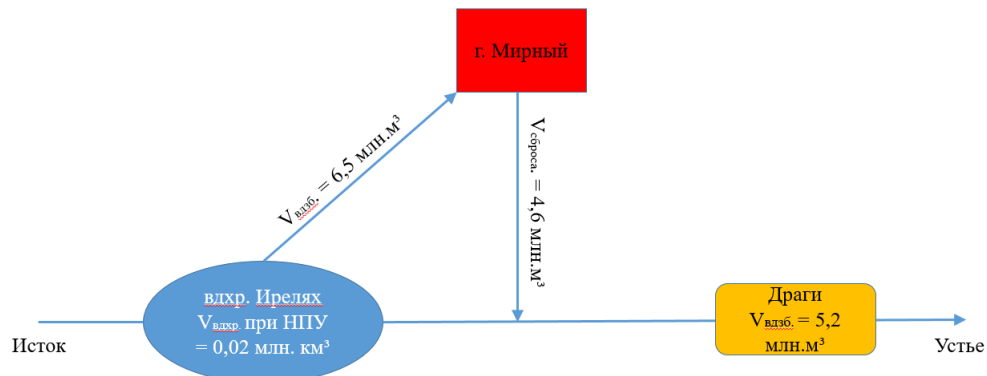


Рис. 6. Схема распределения объемов стока р. Ирелях
Fig. 6. Scheme of distribution of Irelyakh River runoff volumes

Приведенные обобщенные цифры подтверждаются данными натурных наблюдений 2024 г. на семи наблюдательных створах в среднем и нижнем течении реки (см. рис. 2). Минимальный расход воды, равный 0,186 м³/с, наблюдается в створе № 7 – на фоновом участке реки. Ниже Иреляхского гидроузла, в створе № 6 (выше сброса КОС) расход воды составил 0,690 м³/с; в створе № 5, ниже сброса КОС – 0,869 м³/с, что определяет объем сброса КОС в момент измерений 0,179 м³/с, или 15 470 м³/сут, это сопоставимо с показателями прошлых лет. Максимальный расход воды (2,222 м³/с) отмечен в створе № 4, в приустьевом створе № 1 он равен 1,631 м³/с. Потеря стока на приустьевом участке р. Ирелях составила 0,405 м³/с, расходуемых на водозабор для драг прииска "Ирелях" Мирнинского ГОКа и испарение с поверхности дражных котлованов.

Современные колебания водного стока р. Ирелях охарактеризованы по данным многократных измерений расхода воды в 2022 г. в створе № 6 в 0,6 км выше КОС г. Мирный (см. рис. 2), и сопоставлены с историческими данными (рис. 7).

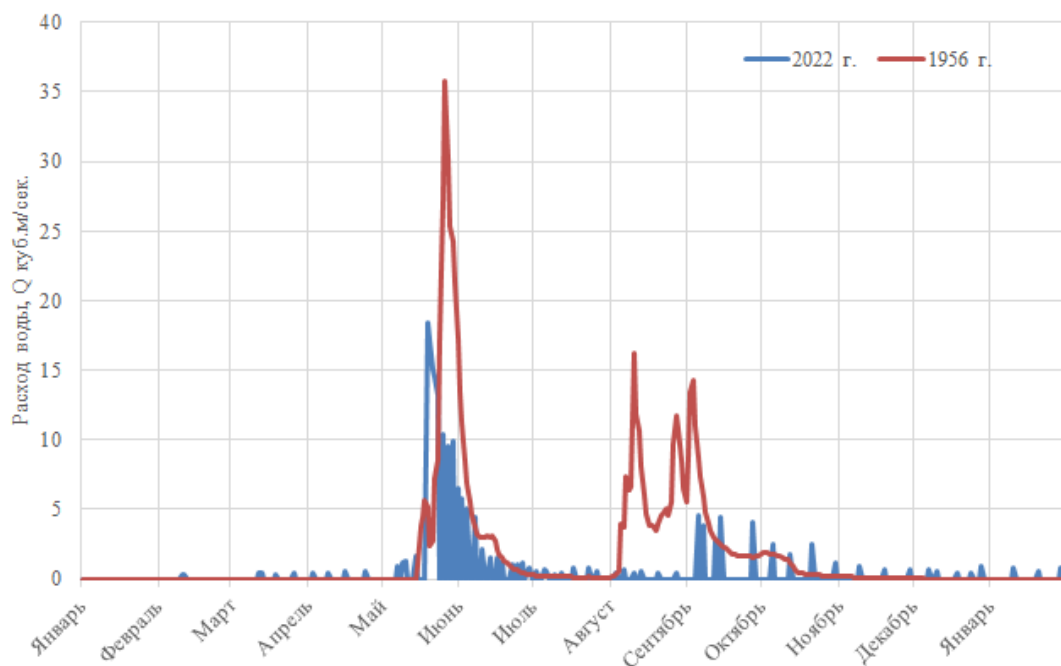


Рис. 7. Гидрограф р. Ирелях
Fig. 7. Hydrograph of the Irelyakh River

Максимальный расход воды на пике весеннего половодья 2022 г. оказался почти в два раза ниже маловодного 1956 г., что связано с аккумуляцией воды в Иреляхском водохранилище и, в меньшей степени, водозабором для нужд г. Мирный. Дождевые паводки 2022 г. также оказались значительно меньше по водности, чем в фоновом 1956 г. Основные изменения касаются зимнего стока, где в 2022 г. наблюдается русловой сток подо льдом, тогда как в 1956 г. река перемерзала до дна. Поскольку створ № 6 расположен выше сброса КОС, предполагается, что этот расход воды обеспечивается фильтрацией воды в талом основании плотины Иреляхского гидроузла до 1 000 м³/ч (Долгих, 2021).

Испарение с открытой водной поверхности

Потеря воды с открытой поверхности Иреляхского водохранилища и хорошо прогреваемых дражных котлованов безвозвратно извлекает воду из оборота, что относится к элементам техногенной трансформации водного баланса исследуемого водотока. В данной работе декадный слой испарения с водной поверхности (испаряемость) рассчитан для периода с 2018 по 2024 гг. по данным авиационной метеорологической станции гражданской – Мирный (Мирный АМСГ), Якутского УГМС по формуле Н. Н. Иванова

$$E_{0,д} = 0,061 \cdot (25 + t)^2 \cdot (1 - 0,01\beta), \quad (1)$$

где t – среднедекадная температура воздуха, °С; β – среднедекадная относительная влажность воздуха, %.

Расчет выполнен по данным за летний сезон, с июня по август, и не учитывает возможное испарение в первые дни сентября. Самый жаркий месяц лета – июль, редко – июнь (2018 г.); самый прохладный – август. Наибольшая испаряемость наблюдается в июне, по сочетанию высокой температуры воздуха и низкой относительной влажности; только в 2023–2024 гг. максимальная испаряемость отмечена в июле. Суммарная испаряемость за летний сезон равна 355 мм в среднем, варьируя от 317 мм (2018 г.) до 408 мм (рис. 8), что сопоставимо со среднегодовой суммой осадков за тот же период, 329 мм, и значительно больше средней суммы летних осадков, 149 мм. Среднее отношение испаряемости к осадкам равно 1,17 и в отдельные годы составляет от 0,8 в 2018 г. до 2,2 в 2021 г., когда над территорией западной Якутии наблюдался минимум циклонов и отмечалась катастрофическая горимость лесов (Игнатьева и др., 2024).

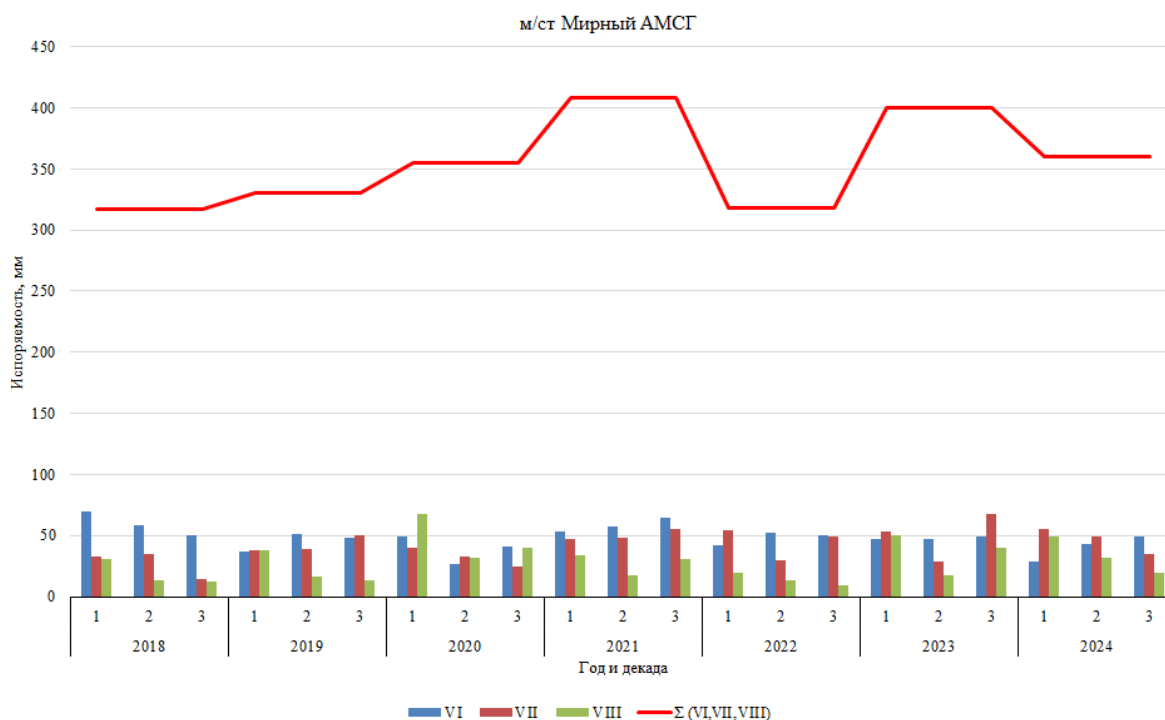


Рис. 8. Суммарная летняя и декадная испаряемость в районе метеостанции Мирный (АМСГ) в период с 2018 по 2024 г., рассчитанная по формуле Н. Н. Иванова, уравнение (1)

Fig. 8. Total summer and decadal evaporation in the area of the Mirny meteorological station (AMSG) in the period from 2018 to 2024 calculated using the formula of N. N. Ivanov, equation (1)

Полученные результаты позволяют оценить суммарный объем потерь на испарение с искусственных водоемов Мирнинского промышленного района. Принимая площадь зеркала Иреляхского водохранилища при нормальном подпорном уровне (НПУ) равной 4,0 км² (Разработка..., 2013), потери на испарение с его поверхности нами оценены в 1,42 млн м³, что сопоставимо с потерями на сетях жилищно-коммунального хозяйства г. Мирный (см. выше). Потери на испарение частично компенсируются выпадением осадков на водное зеркало, объем которых равен 0,6 млн м³.

Площадь дражных котлованов меняется от года к году, поэтому в расчетах было принято максимальное значение для многолетнего периода, равное 9,0 км²; потери на испарение с их поверхности за летний сезон составляют 3,2 млн м³, или свыше 60 % от объема водоотведения на заполнение данных водоемов – 5,2 млн м³, при сумме летних осадков 1,34 млн м³. Полученную оценку испаряемости с поверхности дражных водоемов считаем заниженной, поскольку данные водные объекты имеют, как правило, высокую мутность, вследствие чего сильнее нагреваются и более активно испаряют. Кроме того, в приведенных расчетах не учитывается ветровое воздействие, которое также способствует интенсивному испарению.

Максимальные расходы дождевых паводков на р. Ирелях

Инженерные гидротехнические сооружения, обеспечивающие освоение территории Мирнинского промышленного района, одновременно являются источниками значимых гидрологических рисков, уровень опасности которых возрастает в условиях современных климатических изменений. В августе 2018 г. размыв дамб дражных котлованов на р. Ирелях в результате высокого дождевого паводка привел к загрязнению вод самой р. Ирелях, а также нижерасположенных рек Малая Ботуобия, Вилюй и Лена. По распространенному мнению, к переполнению котлованов и прорыву ограждающих дамб дражных котлованов привели интенсивные дождевые осадки, в связи с чем возникает задача оценки современных обеспеченных максимальных расходов дождевых паводков и их прогноза в климате будущего.

При отсутствии гидрометрических наблюдений на реках с площадью водосбора свыше 200 км² актуальный СП 33-101-2003¹⁰ рекомендует в расчетах максимальных расходов дождевых паводков пользоваться эмпирическими редуцированными формулами типа I при наличии рек-аналогов, формулами типа II – при отсутствии рек-аналогов (Таблица Б.7 СП 33-101-2003). Нами выполнены расчеты по обеим формулам, что необходимо для оценки неопределенности данной гидрологической характеристики.

Наблюдательная сеть в районе исследований редкая, гидрологические посты расположены в основном на главной реке Вилюй и в зоне подпора от Вилюйского водохранилища; на большинстве постов ряды наблюдений имеют недостаточную длину. Для расчета по формуле типа I подобрана река-аналог: р. Кемпендяй в створе пос. Кемпендяй, данные по которой доступны за период с 1945 г. Формула типа I (формула 7.14 СП 33-101-2003)¹¹

$$Q_{p\%} = q_{p\% a} \cdot \varphi_m \cdot (\delta\delta_2/\delta_a\delta_{2a}) \cdot A, \quad (2)$$

где $Q_{p\%}$ – максимальный срочный расход воды дождевого паводка заданной вероятности превышения p , м³/с; $q_{p\% a}$ – модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога заданной вероятности превышения p , м³/(с·км²); φ_m – коэффициент, учитывающий редуциацию максимального модуля стока дождевого паводка с увеличением размера водотока; δ и δ_a – поправочные коэффициенты, учитывающие регулирующее влияние озер на неизученной реке и реке-аналоге; δ_2 и δ_{2a} – поправочные коэффициенты, учитывающие регулирующее влияние болот и заболоченных территорий на неизученной реке и реке-аналоге; A – площадь водосбора, км². Характеристики водосбора и гидрологического режима в створе р. Кемпендяй – пос. Кемпендяй, необходимые для расчета, приведены в табл. 1. Расчетные значения параметров, входящих в уравнение (2), приведены в табл. 2.

Таблица 1. Основные гидрологические и гидрографические характеристики бассейна р. Кемпендяй в створе пос. Кемпендяй

Table 1. Basic hydrological and hydrographic features of the Kemptendiy River basin at Kemptendiy cross-section

	Обеспеченность		
	0,1 %	1 %	2 %
$Q_{p\% a}$	81,5	55,8	47,6
A_a , км ²	1 290		
A_{δ_2} , %	0,7		
A_{δ} , %	0,2		

Значение показателя степени n определено согласно рекомендациям Приложения В СП 33-101-2003¹² как тангенс угла наклона линейной зависимости $q_{1\%} = f(A)$, построенной в двойных логарифмических координатах, по данным о модуле стока $q_{1\%}$ на близлежащих гидрологических постах. Значение параметров C и β принято по рекомендациям п. В.10 Приложения В.

¹⁰ СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. С. 73.

¹¹ Там же.

¹² Там же.

Формула типа II (формула 7.21 СП 33-101-2003)

$$Q_{p\%} = q_{200} \cdot (200/A)^n \cdot \delta \delta_2 \delta_3 \cdot \lambda_{p\%} \cdot A, \quad (3)$$

где q_{200} – модуль максимального срочного расхода воды дождевого паводка ежегодной вероятности превышения 1 %, приведенный к площади водосбора 200 км² при $\delta = \delta_2 = \delta_3 = 1$; δ_3 – поправочный коэффициент, учитывающий изменение параметра q_{200} с увеличением средней высоты водосбора в горных и полугорных районах; $\lambda_{p\%}$ – переходный коэффициент от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятности превышения 1 % к значениям другой вероятности превышения. Значение параметра $\delta_3 = 1$ принято, поскольку территория не относится к горным и полугорным. Результаты расчета по формуле типа II приведены в табл. 3.

Таблица 2. Вычисление максимального срочного расхода воды дождевого паводка р. Ирелях в верхнем бьефе Иреляхского водохранилища по формуле типа I

Table 2. Calculation of maximum water discharge of rain floods for the Irelyakh River upstream of the Irelyakh Reservoir using Type I equation

Параметр	Формула	Обеспеченность			Номер	Источник
		0,1 %	1 %	2 %		
$q_{p\% a}$	$q_{p\% a} = Q_{p\% a} / A_a$	0,0632	0,0433	0,0369	(7.15)	СП 33-101-2003 ¹³
n		0,32			Прил. В	
η_{Φ}	$\eta_{\Phi} = LA_a^{0,56} / L_a A^{0,56}$	0,77			(7.16)	
Φ_M	$\Phi_M = (A_a/A)^n$	1,20			(7.17)	
C		0,11				Методические рекомендации, 2009 ¹⁴
δ	$\delta = 1/(1 + CA_{03})$	0,910			(8.6)	
δ_a	$\delta_a = 1/(1 + CA_{03,a})$	0,929			(8.6)	
β		0,5				
δ_2	$\delta_2 = 1 - \beta \cdot \lg(0,1 \cdot A_{\beta} + 1)$	0,994			(8.8)	
δ_{2a}	$\delta_{2a} = 1 - \beta \cdot \lg(0,1 \cdot A_{\beta,a} + 1)$	0,996			(8.8)	
$Q_{p\%}$	Уравнение (2), створ ГЭС	46,5	31,9	27,2	(7.14)	СП 33-101-2003 ¹⁵
$Q_{p\%}$	Уравнение (2), створ 1	65,8	40,3	38,4	(7.14)	

Таблица 3. Вычисление максимального срочного расхода воды дождевого паводка р. Ирелях в верхнем бьефе Иреляхского водохранилища по формуле типа II

Table 3. Calculation of maximum urgent water discharge of rain floods for the Irelyakh River in the upper pool of Irelyakh Reservoir using Type II equation

Параметр	Формула	Обеспеченность			Номер	Источник
		0,1 %	1 %	2 %		
q_{200}	Региональная карта	0,22			Прил. В	СП 33-101-2003 ¹⁶ СНиП 2.01.14-83 ¹⁷
n		0,32			Прил. В	
δ_3		1,0			п. 7.42	
$\lambda_{p\%}$	$\lambda_{p\%} = Q_{p\%} / Q_{1\%}$	1,475	1,0	0,85	(7.22) Прил. 20	
$Q_{p\%}$	Уравнение (3), створ ГЭС	122	82,5	70,1	(7.21)	
$Q_{p\%}$	Уравнение (3), створ 1	154	104	88,7	(7.21)	

Обсуждение и результаты

Климатические изменения ближайших десятилетий, как ожидается, приведут к росту температуры воздуха во все сезоны года при значительной неопределенности относительно годовой суммы осадков, а также к увеличению повторяемости экстремальных явлений, в том числе – дождевых событий редкой обеспеченности (вероятности превышения), и вслед за этим – к росту ущерба от быстрых дождевых наводнений (*Dottori et al., 2018*). Ожидаемое повышение температуры воздуха приведет к увеличению потерь на испарение, что приведет к дальнейшей трансформации водного режима р. Ирелях. В этой связи

¹³ СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. С. 73.

¹⁴ Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб. : Нестор-История, 2009. С. 193.

¹⁵ СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. С. 73.

¹⁶ Там же.

¹⁷ СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой СССР. 1985. С. 36.

в данной работе выполнен расчет испарения с открытой водной поверхности максимальных расходов дождевых паводков р. Ирелях в современных климатических условиях; эти данные могут послужить "базовыми линиями" для прогноза климатических изменений в бассейне р. Ирелях и их гидрологических последствий. Однако в прогнозировании гидрологических характеристик имеются значительные методические сложности.

Современные оценки указывают на интенсивное увеличение среднегодовой температуры воздуха, от +0,3 до 0,4 °C/10 лет и годовой суммы осадков – от 8 до 12 мм/10 лет, на территории Республики Саха (Якутия) в период с 1966 по 2016 гг. (Горохов и др., 2018). Потенциальные гидрологические последствия климатических изменений для антропогенно-преобразованной гидрологической системы бассейна р. Ирелях заключаются в увеличении среднедекадной температуры воздуха, приводящей к росту испаряемости с открытой водной поверхности, который отчасти будет скомпенсирован возрастающим количеством осадков. Ожидаемые величины испарения с водной поверхности и водопотерь могут быть рассчитаны с применением формулы Н. Н. Иванова по данным о прогнозной среднедекадной температуре воздуха, полученной из данных глобального климатического моделирования для заданного сценария и временного среза. Аналогично может быть рассчитано поступление воды с атмосферными осадками, что позволяет интегрально оценить техногенное влияние на водный баланс р. Ирелях в климате будущего.

Максимальный расход дождевых паводков, определенный по редуцированным формулам двух типов, различается более чем в два раза, что свидетельствует о сложности учета пространственной изменчивости основных гидрологических характеристик в слабоизученных районах. Бассейн-аналог – р. Кемпендэй – расположен на 250 км восточнее бассейна р. Ирелях, в направлении аридизации регионального климата. Известно, что над западной Якутией летние циклоны наблюдаются чаще, чем в центральных и южных районах республики (Игнатьева и др., 2024), и, как следствие, дождевые осадки имеют большую повторяемость. Принятое в расчете значение модуля максимального стока $q_{200} = 0,22 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ значительно больше, чем рассчитанное для створа р. Кемпендэй – пос. Кемпендэй, $q_{200} = 0,09 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$, и соответствует близрасположенным постам, использовать которые в качестве рек-аналогов невозможно по причине непродолжительных наблюдений (в среднем менее 30 лет). На наш взгляд, ориентироваться следует на величины максимального расхода дождевых паводков, полученные по формуле типа II, как лучше отражающие местные гидрологические характеристики. Региональное картирование нормативных расчетных параметров позволит в перспективе уточнить используемые в расчете значения и повысить точность гидрологических прогнозов.

Прогноз максимального расхода воды дождевых паводков в климате будущего, как отмечено выше, получить значительно сложнее, поскольку в расчетные формулы типа I и II СП 33-101-2003¹⁸, применяемые для рек с площадью водосбора более 200 км², не входят характеристики осадков либо другие климатические параметры. Как следствие, невозможно напрямую использовать сценарные прогнозы, полученные на основе глобальных климатических моделей. Использование формул типа I и II в прогнозном расчете затрудняется также отсутствием реальных рек-аналогов, на которых значения $q_{1\%}$ соответствовали бы прогнозным климатическим условиям будущего; аналогично, невозможно обосновать никакую гипотезу изменения показателя степени n , а для формулы II – также и вероятное изменение значений q_{200} и переходных коэффициентов $\lambda_{p\%}$ при смене режима выпадения осадков (дождевые осадки выпадают реже, но интенсивность и суммарный слой осадков дождевого события увеличиваются (Clarke et al., 2022)). Одно из потенциально эффективных решений лежит в плоскости регионального картирования значений $H_{1\%}$, максимального суточного или пентадного слоя дождевых осадков вероятностью превышения 1 %, и поиска взаимосвязей между значениями $H_{1\%}$ и $q_{1\%}$ или q_{200} , что позволяет использовать прогнозные значения $H_{1\%}$, полученные из данных климатических моделей, для расчета $q_{1\%}$ и q_{200} .

Для рек с площадью водосбора менее 200 км² допустимо применять расчетную формулу типа III (предельной интенсивности), в которой используется величина $H_{1\%}$, ожидаемое изменение которой может быть оценено по данным глобальных климатических моделей. Основным источником неопределенности в этом случае служит несоответствие между размером водосбора (менее 200 км²) и размером модельной ячейки – от 525 до 250 000 км² в зависимости от модели, и 2 500 км² в актуальной версии регионального ансамбля моделей (Tananaev, 2024). В этом случае предлагается сопоставить модельные значения $H_{1\%}$ из эксперимента "historical" международного проекта сравнения глобальных климатических моделей СМIP6 (Tananaev, 2024) и их функции распределения с фактически наблюдаемыми значениями $H_{1\%}$, полученными на метеостанциях, затем рассчитать и ввести необходимые региональные поправки.

Для рек любых размеров допустимо использование формул типа IV, к которым относятся объемные, генетические и другие формулы, основанные на расчете стока по осадкам, в том числе через индекс

¹⁸ СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. С. 73.

предшествующего увлажнения (таблица Б.7, СП 33-101-2003)¹⁹. В таких расчетах также могут быть использованы данные климатических моделей, в том числе эксперимента "historical" (Tananaev, 2024), для расчета необходимых характеристик, используемых в таких формулах.

Основные источники неопределенности, сопутствующие использованию данных климатического моделирования в прогнозах гидрологических последствий изменения климата, связаны с несколькими факторами. Во-первых, как было указано выше, общий вид связи между $H_{1\%}$ и $q_{1\%}$ или q_{200} априори неизвестен, и должен устанавливаться по данным наблюдений; устойчивость вида этой связи во времени – одно из принимаемых в данном случае допущений. Во-вторых, продолжительность склонового добегания $\tau_{ск}$, как ожидается, должна измениться вследствие более глубокого протаивания склонов и, как следствие, роста потерь на инфильтрацию и увеличения продолжительности и объема подповерхностного стекания. В данном случае предлагается использовать в качестве рек-аналогов водотоки, расположенные южнее, в том числе в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. В-третьих, на расчетные значения некоторых гидрологических переменных способна повлиять смена природных зон и растительного покрова – следующие за потеплением климата расширение лесной зоны и смена видового состава типичной растительности. Отметим также, что учащение лесных пожаров также оказывает влияние на формирование максимального стока как напрямую, через изменение характеристик склонового стекания, так и косвенно, через смену видового состава древостоя и увеличение глубины протаивания.

Как следует из приведенного обсуждения, региональный гидрологический прогноз по методикам, основанным на нормах СП 33-101-2003²⁰, сталкивается с рядом затруднений. Однако он необходим для устойчивого функционирования гидротехнических сооружений Мирнинского промышленного района.

Заключение

В работе исследован гидрологический режим р. Ирелях, на которой расположен центр "алмазной провинции" Республики Саха (Якутия), г. Мирный. Выделены три этапа изменений водного режима, связанные с антропогенным освоением территории, и основные факторы его антропогенной трансформации: режим работы Иреляхского гидроузла и водозабор г. Мирный, сброс сточных вод г. Мирный через КОС, забор воды для драг прииска "Ирелях" Мирнинского ГОКа. Исследование показало, что основной объем водного стока выше гидроузла идет на заполнение водохранилища в период половодья, а максимальная сработка водохранилища происходит за счет водопользования города в зимний период. Зимний сток выше КОС определяется режимом работы гидроузла в зимний период и фильтрацией через тело плотины Иреляхского гидроузла. Максимальный объем забора воды для драг приходится на летне-осеннюю межень, где общий объем с трех драг составил – 4,1 млн м³, или 79 % от годового объема. Измеренный в летний период 2024 г. расход воды по створам показал разницу между ними, из чего были подсчитаны объем сброса КОС г. Мирный – 0,179 м³/с, объем забора воды для драг – 0,405 м³/с. Морфология реки, начиная с расположения водохранилища до устья, полностью преобразована, где ниже гидроузла русло реки переработано алмазодобывающими драгами. Отрезок этой территории представляет дражный полигон с множеством мелких водохранилищ, хвостохранилищ и отводными каналами. На данный момент в пределах этой территории работают три драги. Исследование показало, что современный гидрологический режим р. Ирелях существенно отличается от периода естественного стока. Общий объем весеннего половодья и летне-осеннего паводка значительно сократился, наблюдается повышение осеннего меженного стока, а также появился зимний подруслевой сток. Потери водных ресурсов на испарение с открытой водной поверхности Иреляхского водохранилища и дражных котлованов сопоставимы с объемами производственного и коммунального водопользования.

Климатические изменения, как ожидается, проявятся в увеличении максимального суточного слоя осадков, что потенциально может привести к увеличению максимальных расходов воды дождевых паводков редкой повторяемости, к повышению уровня гидрологического риска для расположенных на реке гидротехнических сооружений. Использование данных глобальных климатических моделей позволяет рассчитать прогнозные значения требуемых гидрологических характеристик, однако такие расчеты связаны со значительной неопределенностью.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР Научно-исследовательской лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова (ИЕН СВФУ) по приоритетным направлениям Программы развития СВФУ им. М. К. Аммосова на 2024 и 2025 гг., госбюджетной тематики ИМЗ СО РАН.

¹⁹ СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. С. 73.

²⁰ Там же.

Библиографический список

- Бебихов Ю. В., Семёнов А. С., Подкаменный Ю. А., Якушев И. А. Оценка показателей качества сточных вод и модернизация технологического процесса биологической очистки (на примере г. Мирный Республики Саха (Якутия)) // *Успехи современного естествознания*. 2024. № 7. С. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38290>. EDN: DLHTTV.
- Вечерин П. П. Ирелях – алмазные россыпи. Из опыта партийной работы. Якутск : Якуткнигоиздат, 1968. 54 с.
- Горохов А. Н., Федоров А. Н. Современные тенденции изменения климата в Якутии // *География и природные ресурсы*. 2018. № 2. С. 111–119. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-2\(111-119\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(111-119)). EDN: URPSJU.
- Долгих С. Н. Особенности проектирования и эксплуатации ГТС промышленных комплексов в зоне вечномёрзлых грунтов // *Гидротехника*. 2021. № 2. С. 43–48. EDN: PUBBBZ.
- Зелинская Е. В., Киселева М. А., Шевцов А. С., Базылева А. В. [и др.]. Анализ мероприятий по снижению содержания взвешенных веществ в сточных водах дражных полигонов при переработке алмазосодержащих песков // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № S15. С. 237–246. EDN: LAKAPN.
- Игнатъева Ю. И., Тананаев Н. И. Повторяемость циклонов над территорией Республики Саха (Якутия) в летние месяцы // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Сер. Науки о Земле*. 2024. № 2. С. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.25587/2587-8751-2024-2-46-53>. EDN: ZHOMNO.
- Клименко Д. Е. Методы и средства гидрометеорологических измерений // Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2021. 75 с. EDN: HHJLYS.
- Ксенофонтова М. И., Данилов П. П., Попова А. Г., Габышева А. А. [и др.]. Геоэкологическая оценка состояния р. Вилюй в условиях техногенного воздействия алмазодобывающей промышленности // *Проблемы устойчивого развития региона : IX школа-семинар молодых ученых России : материалы докл., 3–7 июля 2019 г., г. Улан-Удэ. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2019. С. 128–133. EDN: QLBLEK.*
- Мышляков С. Г., Сизов О. С., Горбачева Е. Н., Скачкова А. С. [и др.]. Космический мониторинг антропогенного воздействия в районе алмазодобывающей деятельности (на примере Мирнинского ГОК) // *Геоматика*. 2015. № 4. С. 42–52. EDN: VCNGXJ.
- Наумова О. П., Кожин В. А., Середкина Е. В. Анализ динамики показателей воздействия предприятий АК "Алроса" на окружающую природную среду // *Экология и промышленность России*. 2013. № 8. С. 34–39. EDN: QZMTEN.
- Николаева Н. А., Копырина Л. И. Оценка некоторых аспектов состояния рек и ландшафтов Западной Якутии в условиях антропогенного воздействия // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 6. С. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38054>. EDN: UHPYMF.
- Поддубский А. А. Оценка природной влагообеспеченности Московской области // *Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. Агрономия и животноводство*. 2015. № 2. С. 45–50. EDN: TVSHPI.
- Портыненко О. Н. Гигиеническая оценка поверхностных источников водоснабжения Вилюйской группы улусов // *Инновации. Наука. Образование*. 2021. № 46. С. 569–585. EDN: WOYNFA.
- Разработка проекта правил использования водных ресурсов Иреляхского водохранилища / ООО "ВЕД". М., 2013. С. 138. (Архив Ленского БУ Росводресурсов).
- Рыбкина И. Д. Оценка антропогенной нагрузки на водные ресурсы и эффективности их использования: обзор методологических подходов // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2023. Т. 9, № 2. С. 55–67. DOI: <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-2-55-67>. EDN: НКНЕVD.
- Сафронов Г. П., Ербаева Э. А., Поздняков А. И. Современное состояние зообентоса некоторых малых рек Республики Саха (Якутия) // *Байкальский зоологический журнал*. 2009. № 1. С. 10–16. EDN: RKODSR.
- Семенова К. С. Оценка формулы определения испаряемости для создания осушительно-увлажнительных земель на осушенных торфяниках Мещерской низменности // *Природообустройство*. 2019. № 3. С. 23–28. DOI: [10.34677/1997-6011/2019-4-23-29](https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-4-23-29). EDN: СКВОZX.
- Тихонова С. А., Стручкова Г. П., Крупнова Т. Г., Капитонова Т. А. [и др.]. Оценка загрязнения тяжелыми металлами водных объектов Якутии по спектральным характеристикам космоснимков // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2024. № 7–1. С. 83–92. DOI: [10.25018/0236_1493_2024_71_0_83](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_71_0_83). EDN: WBJJZB.
- Янников А. М., Полицинский М. С., Великин С. А. Перспективы использования инженерно-геофизических методов на гидроузле реки Ирелях (Западная Якутия) // *Вестник Пермского университета. Геология*. Т. 23, № 2. 2024. С. 136–144. DOI: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.23.2.136>. EDN: QQBIFV.
- Clarke B., Otto F., Stuart-Smith R., Harrington L. Extreme weather impacts of climate change: An attribution perspective // *Environmental Research: Climate*. 2022. Vol. 1. Article number: 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d>.

- Dottori F., Szweczyk W., Ciscar J.-C., Zhao F. [et al.]. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. P. 781–786. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>.
- Tananaev N. I. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia // *Polar Science*. 2024. Vol. 41. Article number: 101066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101066>.

References

- Bebikhov, Yu. V., Semenov, A. S., Podkamenny, Yu. A., Yakushev, I. A. 2024. Assessment of wastewater quality indicators and modernization of the technological process of biological treatment (by the example of Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)). *Advances in Current Natural Sciences*, 7, pp. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38290>. EDN: DLHTTB. (In Russ.)
- Vecherin, P. P. 1968. Irelyakh – diamond placers. From the experience of party work. Yakutsk. (In Russ.)
- Gorokhov, A. N., Fedorov, A. N. 2018. Current trends in climate change in Yakutia. *Geografia i Prirodnye Resursy*, 2, pp. 111–119. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(111-119). EDN: URPSJU. (In Russ.)
- Dolgikh, S. N. 2021. Features of design and operation of GTS of industrial complexes in the zone of permafrost soils. *The Hydrotechnika*, 2, pp. 43–48. EDN: PUBBBZ. (In Russ.)
- Zelinskaya, E. V., Kiseleva, M. A., Shevtsov, A. S., Bazyleva, A. V. et al. 2009. Analysis of measures to reduce the content of suspended solids in wastewater of dredge dumps during processing of diamond-containing sands. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, S15, pp. 237–246. EDN: LAKAPN. (In Russ.)
- Ignatyeva, Yu. I., Tananaev, N. I. 2024. Repeatability of cyclones over the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) in the summer months. *Bulletin of the North-Eastern Federal University. Series Earth Sciences*, 2, pp. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.25587/2587-8751-2024-2-46-53>. EDN: ZHOMHO. (In Russ.)
- Klimenko, D. E. 2021. Methods and means of hydrometeorological measurements. Yekaterinburg. EDN: HHJLYS. (In Russ.)
- Ksenofontova, M. I., Danilov, P. P., Popova, A. G., Gabysheva, A. A. et al. 2019. Geo-ecological assessment of the Vilyui River in the conditions of technogenic impact of diamond mining. Proceedings of reports *Problems of sustainable development of the region*, Ulan-Ude, 3–7 July 2019. Ulan-Ude, pp. 128–133. EDN: QLBLEK. (In Russ.)
- Myshlyakov, S. G., Sizov, O. S., Gorbacheva, E. N., Skachkova, A. S. et al. 2015. Space monitoring of anthropogenic impact in the area of diamond mining activities (on the example of Mirny Mining and Processing Plant). *Geomatics*, 4, pp. 42–52. EDN: VCNGXJ. (In Russ.)
- Naumova, O. P., Kozhin, V. A., Seredkina, E. V. 2013. Analysis of the dynamics of indicators of the impact of Alrosa enterprises on the environment. *Ecology and Industry of Russia*, 8, pp. 34–39. EDN: QZMTEN. (In Russ.)
- Nikolaeva, N. A., Kopyrina, L. I. 2023. Assessment of certain aspects of the conditions of rivers and landscapes of Western Yakutia under anthropogenic impact. *Advances in Current Natural Sciences*, 6, pp. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.38054>. EDN: UHPYMF. (In Russ.)
- Poddubsky, A. A. 2015. Assessment of natural moisture supply in the Moscow region. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, 2, pp. 45–50. EDN: TVSHPJ. (In Russ.)
- Portynenko, O. N. 2021. Hygienic assessment of surface water supply sources of the Vilyui group of uluses. *Innovations. Science. Education*, 46, pp. 569–585. EDN: WOYNFA. (In Russ.)
- Development of the draft rules for the use of water resources of the Irelyakh reservoir. 2013. LLC "VED". Moscow, pp. 138. (Archive of the Lensky Basin Water Management – Rosvodresursy) (In Russ.)
- Rybkina, I. D. 2023. Assessment of anthropogenic load on water resources and efficiency of their use: Review of methodological approaches. *Anthropogenic Transformation of the Natural Environment*, 9(2), pp. 55–67. DOI: <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-2-55-67>. EDN: HKHEVD. (In Russ.)
- Safronov, G. P., Erbaeva, E. A., Pozdnyakov, A. I. 2009. Current state of zoobenthos of some small rivers of the Republic of Sakha (Yakutia). *Baikal Zoological Journal*, 1, pp. 10–16. EDN: RKODSR. (In Russ.)
- Semenova, K. S. 2019. Evaluation of the formula for determining evapotranspiration for the creation of drainage-humidifying lands on drained peatlands of the Meshcherskaya lowland. *Prirodoobustrojstvo*, 3, pp. 23–28. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-23-29. EDN: CKBOZX. (In Russ.)
- Tikhonova, S. A., Struchkova, G. P., Krupnova, T. G., Kapitonova, T. A. et al. 2024. Assessment of heavy metal pollution of water bodies of Yakutia by spectral characteristics of space images. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 7–1, pp. 83–92. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_83. EDN: WBJJZB. (In Russ.)
- Yannikov, A. M., Politsinsky, M. S., Velikin, S. A. 2024. Prospects for the use of engineering-geophysical methods at the Irelyakh River hydroscheme (Western Yakutia). *Bulletin of Perm University. Geology*, 23(2), pp. 136–144. DOI: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.23.2.136>. EDN: QQBIFV. (In Russ.)
- Clarke, B., Otto, F., Stuart-Smith, R., Harrington, L. 2022. Extreme weather impacts of climate change: An attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, 1. Article number: 012001. DOI: <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d>.

Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J.-C., Zhao, F. et al. 2018. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 8, pp. 781–786. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>.

Tananaev, N. I. 2024. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia. *Polar Science*, 41. Article number: 101066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101066>.

Сведения об авторах

Алексеев Иван Иванович – ул. Кулаковского, 48, г. Якутск, Россия, 677013;
Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова,
аспирант; e-mail: ivan1989alex@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7087-5168>

Ivan I. Alekseev – 48 Kulakovsky Str., Yakutsk, Russia, 677013;
Institute of Natural Studies, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Ph.D. Student;
e-mail: ivan1989alex@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7087-5168>

Тананаев Никита Иванович – ул. Кулаковского, 46, г. Якутск, Россия, 677013;
Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова,
канд. геогр. наук, доцент;
ул. Мерзлотная, 36, г. Якутск, Россия, 677010; Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
СО РАН, вед. науч. сотрудник;
e-mail: tanni@s-vfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>

Nikita I. Tananaev – 46 Kulakovsky Str., Yakutsk, Russia, 677013;
Institute of Natural Studies, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Cand. Sci. (Geography),
Associate Professor;
36 Merzlotnaya Str., Yakutsk, Russia, 677010; Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch RAS,
Leading Researcher;
e-mail: tanni@s-vfu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>

Короткий Александр Анатольевич – ул. Гагарина, 27, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия,
678147; ООО "ИТЭЛЬ", директор; e-mail: korotkyaa@mail.ru

Alexander A. Korotky – 27 Gagarina Str., Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, 678147; Director,
ITEL LLC; e-mail: korotkyaa@mail.ru