

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Землянскова А.А., Макарьева О.М. Моделирование процессов формирования стока рек горной криолитозоны северо-востока России с наледным питанием на примере р. Анмангында // Арктика и Антарктика. 2024. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.69780 EDN: EAMLTk URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=69780

Моделирование процессов формирования стока рек горной криолитозоны северо-востока России с наледным питанием на примере р. Анмангында

Землянскова Анастасия Александровна

ORCID: 0000-0002-2249-5708

лаборант, Северо-Восточный государственный университет; младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет

685017, Россия, Магаданская область, г. Магадан, ул. Портовая, 13

✉ anastasiazemlanskova@gmail.com



Макарьева Ольга Михайловна

ORCID: 0000-0002-2532-4306

кандидат технических наук

заведующий лабораторией, Северо-Восточный государственный университет; ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет

685000, Россия, Магаданская область, г. Магадан, ул. Портовая, 13

✉ omakarieva@yandex.ru



[Статья из рубрики "Подземные и поверхностные воды холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2024.2.69780

EDN:

EAMLTk

Дата направления статьи в редакцию:

07-02-2024

Дата публикации:

15-02-2024

Аннотация: Наледи являются ключевым элементом в цепи водообменных процессов

зоны распространения многолетнемерзлых пород. Гидрологическая роль наледей в формировании речного стока может быть сопоставима с ледниками. Наблюдения за наледями при строительстве Байкало-Амурской магистрали показали, что в годовом стоке рек доля наледного стока может достигать 35% для водосборов площадью до 500 км². Несмотря на длительную историю изучения наледей, отсутствуют методы прогноза развития наледных процессов, а также гидрологические модели, учитывающие долю наледного питания в речном стоке. Это связано с недостатком данных наблюдений за динамикой и факторами развития наледей. В прошлом веке в Сибири и на Дальнем Востоке на некоторых наледях проводились продолжительные исследования. Одним из таких уникальных объектов является гигантская Анмангындинская наледь (верховье бассейна р. Колыма). Целью исследования является изучение гидрологического режима бассейна р. Анмангында и разработка метода учета наледного стока (блок «Наледь») для распределенной гидрологической модели «Гидрограф». Блок «Наледь» учитывает два фактора разрушения наледи – под действием солнечной радиации и термоэрозионного разрушения. Входными данными являются площадь наледи к началу теплого сезона и суточные метеорологические данные. Параметрами – коэффициенты таяния льда и испарения со льда, а также коэффициент относительной площади наледи в зависимости от периода разрушения, рассчитанный для современного климатического периода. Результатом расчета являются слои наледного стока и характеристики наледи на заданный интервал. На основе исторических данных и материалов собственных полевых исследований, проведена апробация блока «Наледь». Отклонение расчётных и натурных величин составило 2–10% и 1–9% для максимальных величин площади и объема Анмангындинской наледи соответственно. Результаты численных расчетов за период 1967–2022 гг. выявили динамику вклада Анмангындинской наледи в сток реки в различные сезоны. Расширенный функционал модели «Гидрограф» позволил улучшить качество моделирования стока рек, в бассейнах которых формируются наледи. Для бассейна р. Анмангында средний коэффициент Нэша-Сатклиффа и величина ошибки годового стока составили 0,57 и 13,0% по сравнению со значениями 0,41 и 18,0%, когда не использовался блок «Наледь».

Ключевые слова:

наледь, наледные ресурсы, наледное питание, модель Гидрограф, математическое моделирование, многолетняя мерзлота, река Анмангында, дистанционное зондирование, водный баланс, криолитозона

Полевые исследования на Анмангындинской наледи в 2020-2023 гг. проведены при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата», обработка и анализ полевых данных, а также разработка блока «Наледь» выполнены в рамках проекта Российского научного фонда и Правительства Магаданской области № 23-17-20011 «Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически- и антропогенно-обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород».

Введение

Наледь — специфическая форма сезонного оледенения, характерная для горных условий многолетней мерзлоты [\[1-3\]](#). Площадь одного объекта может измеряться

десятками км², а толщина льда достигать 10—12 м [4]. В условиях глобального потепления климата наблюдается сокращение размеров наледей [5, 6] и их миграция, что оказывает влияние на гидрологический режим рек криолитозоны и геокриологические условия [3, 7]. Крупные размеры наледей обеспечивают высокую идентифицируемость этих объектов на космических снимках, что позволяет использовать их в виде качественных индикаторов трансформации водообмена на обширных, труднодоступных и недостаточно изученных территориях Северо-Востока России, где по последним оценкам насчитывается не менее 6683 наледей с общей площадью около 4500 км² [8].

Наледи являются ключевым элементом в цепи водообменных процессов зоны распространения многолетнемерзлых пород. Согласно наблюдениям Б. Л. Соколова, в мае-июне до 50—90% наледного стока попадает в речной сток, в июле эта доля снижается до 30%, а в августе — до 7%. Гидрологическая роль наледей в формировании речного стока может быть сопоставима с такими снежно-ледовыми явлениями, как ледники, что подтверждается результатами многих исследований [6, 9, 10]. Наблюдения за наледями при строительстве Байкало-Амурской магистрали показали, что в годовом стоке рек доля наледного стока может достигать 35% для водосборов площадью до 500 км². В период весеннего половодья эта доля составляет от 5 до 40%, а в летнем стоке не превышает 10% [11].

Наледи могут играть важную роль в водообеспечении засушливых регионов [2, 12]. Несмотря на историю изучения этого природного явления (более 100 лет) и достигнутые результаты, отсутствуют методы прогноза развития наледных процессов, а также гидрологические модели, учитывающие долю наледного питания в речном стоке. На данный момент реализуются исследования по созданию концептуальных моделей образования наледей [13, 14], что позволит лучше понять их природу. В известных гидрологических моделях, таких как HBV-Light model [15, 16], PREVAN [17] и др. с помощью системы уравнений удовлетворительно описываются разрушение ледника и ледниковый сток, их можно также использовать в отношении наледей с помощью регулирования снежного индекса, но это теряет всякий физический смысл [18].

Проблема разработки математического аппарата, позволяющего прогнозировать размеры и характер наледных процессов, а также учитывать их влияние на речной сток и другие компоненты природной среды кроется в том, что отсутствует государственная программа изучения наледей. Наземные наблюдения в России выполняются благодаря грантовым поддержкам [19-21 и др.] отдельными научными группами, результаты которых часто не сопоставимы друг с другом. Необходима комплексная программа изучения наледей на ключевых объектах в разных регионах, которая будет учитывать особенность климата, геологического строения, рельефа, геокриологических характеристик, ландшафтов на формирование наледей. Данные спутникового мониторинга позволят дать ретроспективную оценку изменения их размеров [5, 22]. В прошлом веке на наледях рр. Самокит, Верина, Анмангында и др. проводились комплексные наблюдения за их водным режимом и ролью наледей в формировании речного стока. Поэтому именно эти объекты и предлагается рассмотреть в первую очередь в качестве ключевых объектов сети наледиметрических пунктов.

В бассейне р. Анмангында (бассейн р. Колымы) был получен длительный ряд данных (1962–1991 гг.) о площади, объеме, толщине гигантской наледи в разные сезоны года, а также гидрологическом режиме реки в створе ниже наледи (1962–1987) и на крупном

притоке руч. Ольчан (1962–1978 гг.). На основе этих материалов были получены интегральные кривые уменьшения морфометрических характеристик наледи, которые применялись в расчетах на других объектах [\[10, 23, 24\]](#).

В данной работе на примере бассейна р. Анмангында предлагается изучить гидрологический режим, а также, используя длительный ряд данных с помощью методов математического моделирования, разработать метод учета наледного питания.

Объект исследования

Площадь водосбора р. Анмангында (впадает в р. Детрин, приток р. Колыма), для которого проводится расчет, составляет 376 км². Территория исследования относится к зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, ее мощность достигает 300 м, уменьшается до 80–100 м в долинах рек и прерывается в таликовых зонах [\[25\]](#). Геологическое строение представлено осадочными породами верхнего триаса, юры и мела. По данным [\[26\]](#) глубина нулевых теплооборотов составляет 11,5 и 13,5 м на высоте 712 и 1027 м соответственно.

Высота водосбора р. Анмангында составляет от 700 до 1850 м. Долина реки на участке образования наледи (рис. 1) имеет трапецидальную форму с пологими склонами. Протяженность наледной поляны составляет около 6–7 км, с абсолютной высотой 700–770 м. Склоны покрыты лиственничным лесом на мохово-лишайниковой подстилке, местами кедровый стланик и пятна открытой тундры. Почвы горнолесные подзолистые, тундровые и горнотундровые.



Рис. 1. Анмангындинская наледь.

Дно долины сложено аллювием, в верхней части он слабо прикрыт кустарничком и моховым покровом. На участках, где лед лежит продолжительное время, образуется кочкарник, а также густой ивняк. Наледь образуется ежегодно, в современный период ее площадь может достигать 5,4 км² (2000 г.), а исторический максимум составил 6,8 км² (1978 г.). Средний объем наледи за период 1963–1991 гг. был 8,5 млн м³, что составляет 22,6 мм годового слоя стока. Современные оценки показывают значительное уменьшение общих размеров Анмангындинской наледи [\[27\]](#), так в 2000–2022 гг.

максимальный объем по расчетным оценкам не превышал 8,2 млн м³, а в среднем составляет 7 млн м³.

Водный режим реки Анмангында характеризуется данными гидрологического поста, расположенного ниже наледи. На участке полыньи выше наледи и в средней части наледной поляны наблюдается круглогодичный сток.

Климат исследуемого района резко континентальной, средняя годовая температура на станции Усть-Омчуг (576 м над ур. моря) за период 1967-2022 гг. составила -9,8°C (в июле +14,5°C, в январе -33,4°C). В самые холодные месяцы (декабрь-январь) температура опускается до -57°C, а в теплые поднимается до +33,6°C (июль). Среднегодовая сумма осадков составляет 341,2 мм (м/с Усть-Омчуг).

Снежный покров в горах устанавливается в конце сентября, а по всему бассейну в середине октября. По данным полевых исследований 2021-2023 гг. высота снега в разных частях водосбора на конец марта составляет от 48 до 84 см, тогда как на м/с Усть-Омчуг — 25 см.

Материалы и методы исследования

Исторические данные

Материалы Колымского управления гидрометеослужбы были собраны, оцифрованы и проанализированы за период 1962-1991 гг. Они включали в себя информацию о динамике площади, объема, толщины льда в разные сезоны года. Подробно анализ и результаты описаны в работах [27, 28]. Отмечено, что за последние 60 лет максимальные размеры наледи сократились на 15 и 17% для площади и объема соответственно (в среднем с 5,5 до 4,7 км², с 8,5 до 7,0 млн м³).

Информация о гидрологическом режиме получена для нижнего створа реки Анмангында (1962-1987) [29].

Современный ряд наблюдений

Оценка современной площади наледи выполнялась на основе анализа космических снимков спутников Landsat (датчики TM, ETM+ и OLI) и Sentinel-2 (датчик MSI) за период 1999-2022 гг. и 2016-2022 гг., соответственно. Точность определения площади льда по снимкам зависит от его разрешения, отклонение от фактического размера наледи может составлять до 15%.

Данные космических снимков не позволяют оценить объем льда, поэтому используется расчетная формула (1):

$$W = 0,364 \cdot S^{1,167}, \quad (1)$$

где W — объем льда (тыс. м³), S — площадь льда, тыс. м², коэффициенты a и n были предложены в работе [27]. Для исторического периода (1963–1990 гг.) формула показала удовлетворительные результаты. Отклонение расчетных от наблюдаемых величин составило 0,01–2,09 млн м³ или 0–5 мм стока.

С помощью беспилотного летательного аппарата в 2021 и 2022 гг. была выполнена съемка наледной поляны. По результатам работы были построены ортофотопланы, определена площадь и объем наледи [30], а также изменение толщины льда. Точность

определения объема зависит от многих факторов — стабилизации камеры, количества контрольных точек, освещения и др. Сравнение наземных наблюдений с данными БПЛА показало, что ошибка толщины льда в теплый период года составила от 0,04 до 1,70 м. В случае грубых ошибок — материалы в анализе не использовались. Так, точность определения объема варьировалась от 0,02 до 0,46 млн м³ (5—13%), что составляет от 0 до 1,5 мм стока для бассейна р. Анмангында.

Модель «Гидрограф»

Математическая модель «Гидрограф» с распределёнными параметрами комбинирует в себе как физически обоснованные, так и концептуальные методы, что позволяет достичь баланса между сложностью расчетов и доступностью параметризации модели [31]. Она применялась для расчета стока рек бассейна р. Колымы, где распространены многолетнемерзлые породы [32, 33], и результаты были приняты удовлетворительными. В расчетах не проводилась оценка вклада наледного питания в сток рек, хотя на территории Северо-Востока страны он может составлять 0,2-11,0 % в период весеннего половодья (май-июнь, бассейн р. Колыма) [8].

В ранее разработанной версии модели «Гидрограф» при расчете процессов формирования стока в зоне распространения многолетнемерзлых пород не учитывалась доля вклада наледного питания в сток рек. Авторами работы был предложен расчетный блок «Наледь», описывающий процессы разрушения наледей и учета наледного питания в формировании речного стока. В рамках адаптации алгоритма и программы модели были модифицированы как расчетные схемы, так и интерфейс.

Для использования модели «Гидрограф» проводится схематизация бассейна реки. Используются две системы — 1) набор репрезентативных (расчетных) точек (РТ), представляющих собой центры ячеек гексагональной сетки, и 2) система стокоформирующих комплексов (СФК), определяемых типом ландшафта, почвы, растительности, высотной поясностью.

Блок «Наледь» представляет собой алгоритм расчета для массива наледей, приуроченного к конкретной РТ. Для каждой наледи в пределах РТ-площади задается информация о ее характеристиках и местоположении — географические координаты (широта, долгота, высота), максимальная площадь (S_{max}) и объем (W_{max}) наледи (определяются по данным полевых исследований или с помощью расчетных формул), средняя толщина льда (D_{max}), как частное от объема и площади льда. Входные метеорологические данные, а именно эффективные температура ($Temp_{ef}$) и дефицит влажности (Def_{ef}) воздуха, рассчитываются с учетом абсолютной высоты наледи.

За основу блока «Наледь» был взят метод Б. Л. Соколова, который основан на динамике сокращения площади наледи в течение теплого периода, начало которого связывается с датой перехода средней суточной температуры воздуха через нуль в сторону положительных значений [10]. Объем льда меняется в зависимости от коэффициента таяния. При разработке метода Б. Л. Соколов использовал ряд данных о динамике наледных явлений по Анмангыдинской наледи, которые в настоящий момент не удовлетворяют современным климатическим условиям. Поэтому, по данным спутникового мониторинга за период (2000-2022 гг.) была уточнена региональная кривая разрушения относительной площади Анмангыдинской наледи.

Для расчета наледного стока учитывается два фактора, влияющих на разрушение

наледь – действие солнечной радиации (Abl_i) и термоэрозионные процессы, когда под воздействием стока речных и подземных вод блоки льда откалываются от основного тела наледи и быстро (в предложенном алгоритме – мгновенно) разрушаются в потоке воды. Такое предложено впервые, ранее блоковое разрушение либо не учитывалось, либо предлагалось решение нескольких уравнений [\[10\]](#). Коэффициент таяния (k_t) был рассчитан по данным полевых исследований 2020-2023 гг. на Анмангындинской наледи, установлено, что для этого объекта он в среднем составляет 1 мм/л·сутки и варьируется от 0,1 до 4,2 мм/л·сутки в зависимости от месяца. В модели он задается единым на весь расчетный интервал времени. Также вводится коэффициент испарения со льда (м/мбар·с). Минимальные размеры наледи, для которой проводится расчет, составляют 0,6 км².

Расчетный интервал времени (РИВ) в модели «Гидрограф» может быть любым (но не более суток) в зависимости от наличия данных. В этой работе предлагается интервал сутки, так на каждые сутки определяется как изменились площадь и объем наледи в результате действия солнечной радиации и термоэрозионного разрушения с учетом испарения с поверхности льда. Толщина льда уменьшается равномерно по всей площади наледи в зависимости от эффективной температуры воздуха и коэффициента таяния льда (блок солнечная радиация). Объем отколовшегося льда рассчитывается, как изменение площади, умноженное на среднюю толщину наледи (блок термомеханическое разрушение наледи). Суммарная потеря объема наледи на РИВ пересчитывается в слой и гидрограф наледного стока. Также на каждый РИВ определяются площадь, объем и средняя толщина наледи, а также слой, объем и расход наледного стока, слой испарения со льда, которые используются для дальнейшего расчета. Ниже приведены формулы, используемые в блоке «Наледь» (рис. 2).

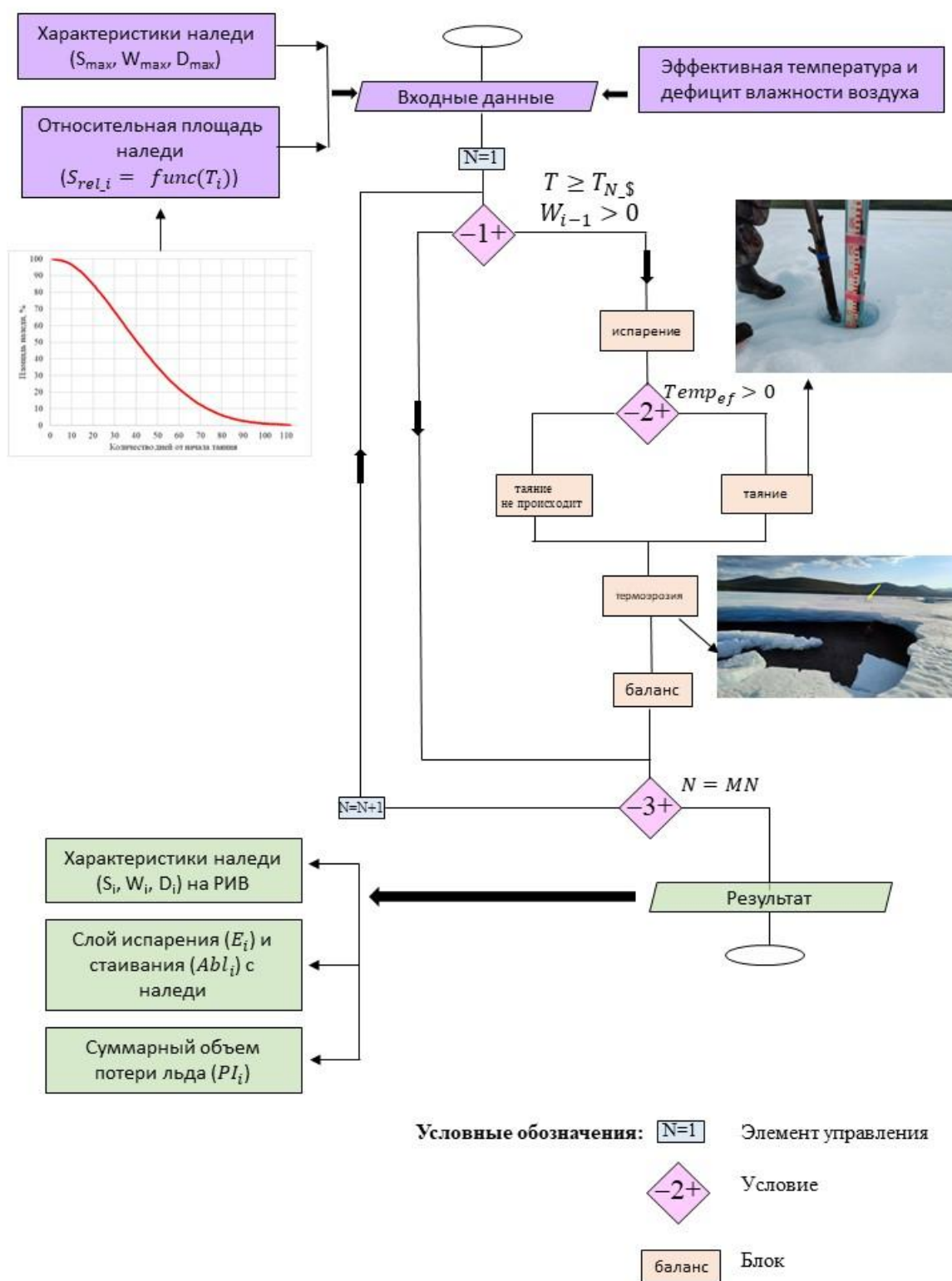


Рис. 2. Блок-схема «Наледь».

1) Солнечная радиация — рассчитывается изменение средней толщины наледи за РИВ в результате прихода солнечной энергии.

$$Abl_i = Temp_{ef} * k_t$$

Если $Abl_i > D_{i-1}$ $Abl_i = D_{i-1}$ (если слой таяния под действием солнечной радиации превышает толщину льда).

$$D_1 = D_{1_1} - Ab l_i$$

$$D_i = D_{i-1_1} - Ab l_i$$

2) Термомеханическое разрушение наледи — рассчитывается изменение площади и объема наледи за счет блокового разрушения.

$$S_1 = S_{max} * S_{rs l_1}$$

$$S_i = S_{max} * S_{rs l_i}$$

$$W_1 = S_1 * D_1$$

$$W_i = S_i * D_i$$

3) Баланс — рассчитывается суммарный объем потери льда в i-й РИВ за счет испарения, блокового разрушения и таяния под действием солнечной радиации.

$$PI_i = W_{i-1} - W_i$$

Апробация метода расчета площади и объема наледи на каждый РИВ (рис. 3) показала, что отклонение полученных значений в среднем не превышает 10% от максимальных характеристик льда, а наибольшее отклонение для конкретного дня составило 24% (табл. 1), что принято удовлетворительным. Максимальная ошибка расчета наблюдается в период июль—август, когда размеры наледи составляют в среднем менее 10% от значений площади и объема до начала таяния.

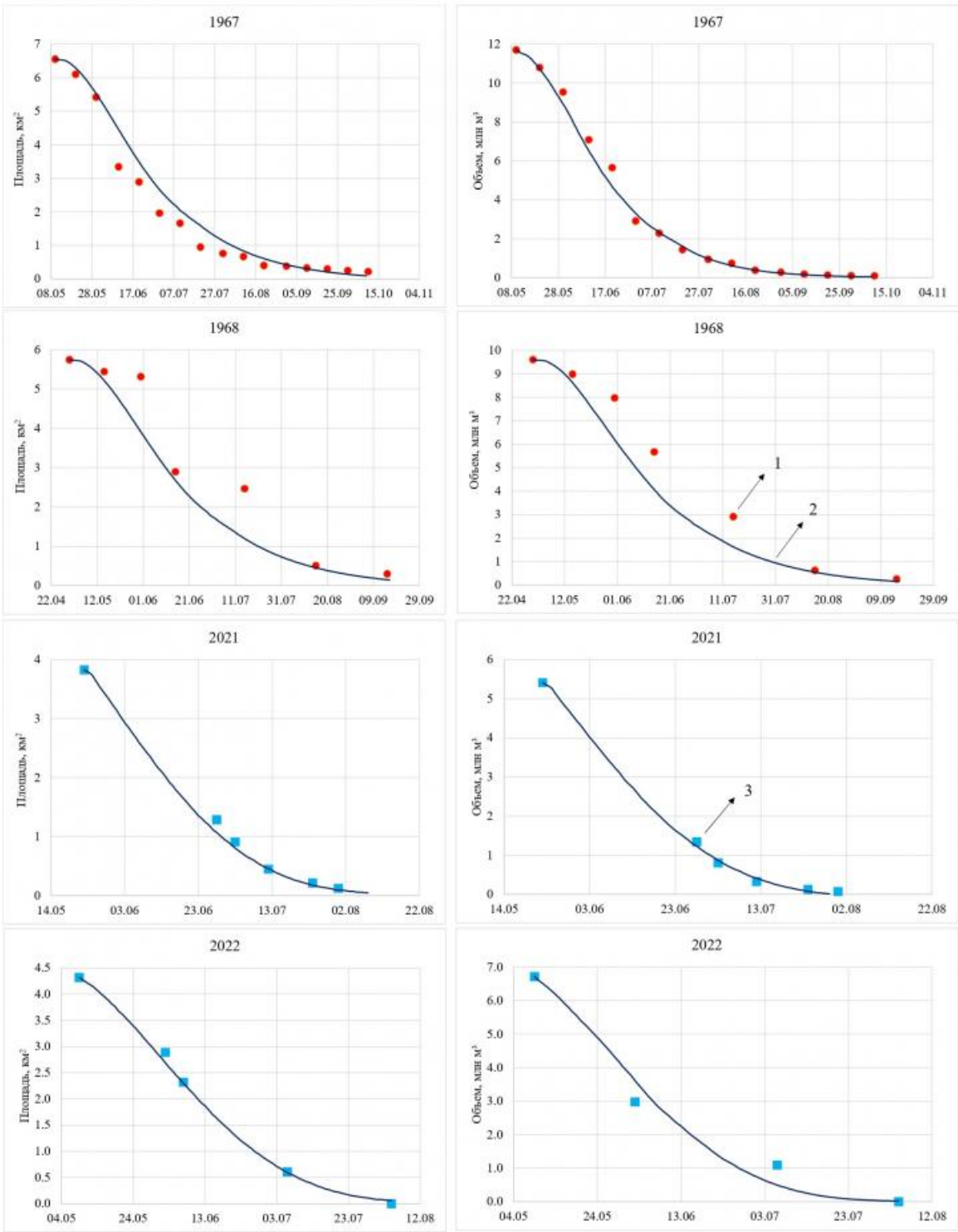


Рис. 3. Апробация метода расчета площади и объема наледи по данным наземных наблюдений (1) и материалам беспилотного летательного аппарата (3). Кривая (2) — результат применения блока «Наледь».

Таблица 1. Отклонение расчетных значений характеристик наледи от наблюдаемых за каждый год.

Год	R площади, %			R объема, %		
	Среднее	MIN	MAX	Среднее	MIN	MAX
1967	5	0,4	17,0	2	0,04	8,3
1968	10	0,9	24,5	9	0,9	18,6
1970	2	0,2	5,2	9	0,9	16,9
2021	2	0,3	5,7	1	0,0	2,0

2021	2	0,5	5,7	1	0,5	2,0
2022	2	0,4	4,7	9	8,9	9,5

R – отклонение от максимальной величины (%).

Параметризация модели «Гидрограф» и используемые данные

В целях параметризации модели для выделения стокоформирующих комплексов (СФК) использовалась карта мерзлотных ландшафтов бассейна р. Анмангында (рис. 4), составленная в 2022 г. [34]. Для каждого СФК использовались ранее разработанные схематизации почвенно-растительного покрова и параметры модели, опубликованные в работах [32, 33, 35].

В качестве входной информации использовались данные метеорологической станции Усть-Омчуг (1967-2022, табл. 2). При интерполяции метеорологических элементов учитывались собственные полевые материалы (2020-2023 гг.), в том числе ряды метеорологических данных, полученных в различных высотных зонах бассейна р. Анмангында.

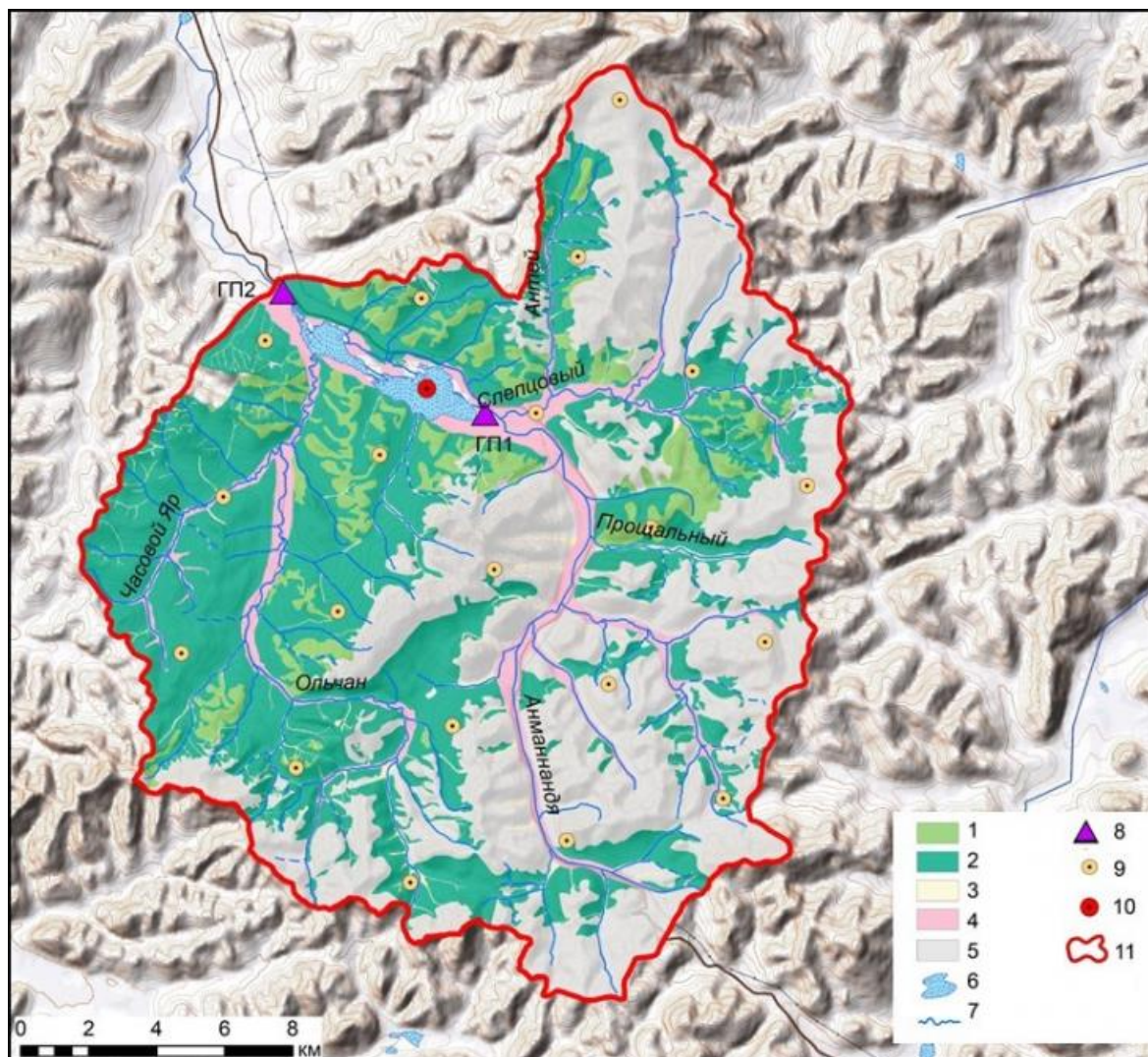


Рис. 4. Схема водосбора р. Анмангында.

Условные обозначения: 1 — горная тундра; 2 — горно-склоновый; 3 — редкий лиственный лес; 4 — речная долина; 5 — каменная осыпь; 6 — наледь; 7 — река; 8 — гидрологический пост; 9 — расчетные точки; 10 — расчетная точка в зоне наледи; 11 — граница бассейна р. Анмангында.

Таблица 2. Материалы, используемые в исследовании.

Данные	Пост, источник данных	Период данных, годы
Температура и влажность воздуха, осадки	м/с Усть-Омчуг	1967-2022
Площадь, объем наледи	Отчеты КУГМС [36]	1963-1991
Площадь наледи	Спутниковые снимки	Landsat 1999–2022 Sentinel-2 2016–2022
Площадь, объем наледи	Беспилотный летательный аппарат	2021, 2022
Расход и температура воды	Замыкающий створ (ГП2) [29]	1962-1987

Результаты

Непрерывное моделирование стока реки Анмангында проведено за период наблюдений за гидрологическим режимом (1967-1987 гг.), который использовался для оценки применимости модели «Гидрограф», а также за 2000-2022 гг., чтобы проследить возможные изменения в регионе. Результатом моделирования являются суточные гидрографы стока воды и значения элементов водного баланса в створе р. Анмангында с учётом наледного стока. В работе [\[33\]](#) для данного объекта модель «Гидрограф» уже использовалась, но без блока «Наледь». Тогда результаты показали, что среднее отклонение расчетного годового гидрографа стока от наблюдаемого составляет 18%, а критерий Нэша-Сатклиффа (NS) изменяется в разные годы от -0,94 до 0,72.

При использовании блока «Наледь» разница между годовыми рассчитанными и наблюдаемыми слоями стока в среднем составила 36 мм или 13%. Медианные значения критерия NS в среднем — 0,57, что выше на 0,16 чем без использования блока «Наледь» (табл. 3). На рис. 5 приведен пример результата расчета стока с помощью модели «Гидрограф». Доля наледного стока в период половодья изменялась от 5 до 36%, а за год — от 4 до 12% (от 15,4 до 31,1 мм).

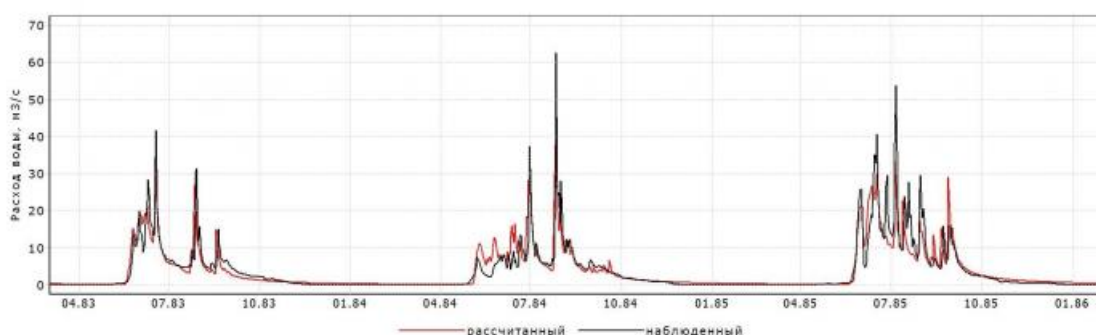


Рис. 5. Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Анмангында, 1983-1985 гг.

Максимальное значение критерия NS составило 0,82 в 1983 г. Годовой сток р. Анмангында в этот период был 253 мм, размеры наледи 5,2 км² и 7,2 млн м³ по площади и объему соответственно. Так, наледное питание реки за этот год составило 19,1 мм или 7,6 % от речного стока.

Таблица 3. Годовой водный баланс и критерии качества моделирования в бассейне р. Анмангында за период 1966-1987 гг. по данным автора и данным диссертационной работы Н. В. Нестеровой.

Параметр	Результаты авторов				Результаты Н. В. Нестеровой [33]		
	Медиана	Среднее	MAX	MIN	Среднее	MAX	MIN
Ys	290	294	424	174	237		
Yo	274	290	459	163	290		
P	384	377	471	241	375		
A	19	20	31	14	-	-	-
E	113	113	129	89	125		
Ro	33	36	107	2	53		
Rs	10	13	58	1	18		
NS	0.62	0.57	0.82	-0.12	0.41	0.72	-0.94
K	0.81	0.80	0.92	0.49			

Y_o и Y_s — наблюдаемый и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P — осадки, мм; A — слой наледного стока, мм; E — испарение, мм; R_o и R_s — отклонение величины стока, в мм и % соответственно; NS — критерий Нэша-Сатклиффа (для суточных значений), б/р; K — коэффициент корреляции (для суточных значений), б/р.

В 1981 г. доля наледного стока в годовом стоке реки была 22,7 мм (12,3%), а в период весеннего половодья (май–июнь) — 19,2 мм или 33%. На рис. 6 показана роль наледи в формировании стока реки Анмангында, так, мы отмечаем, что в маловодные годы в период половодья и летней межени практически весь сток — это результат разрушения наледи. В период весеннего половодья наледные воды идут поверх речного льда.

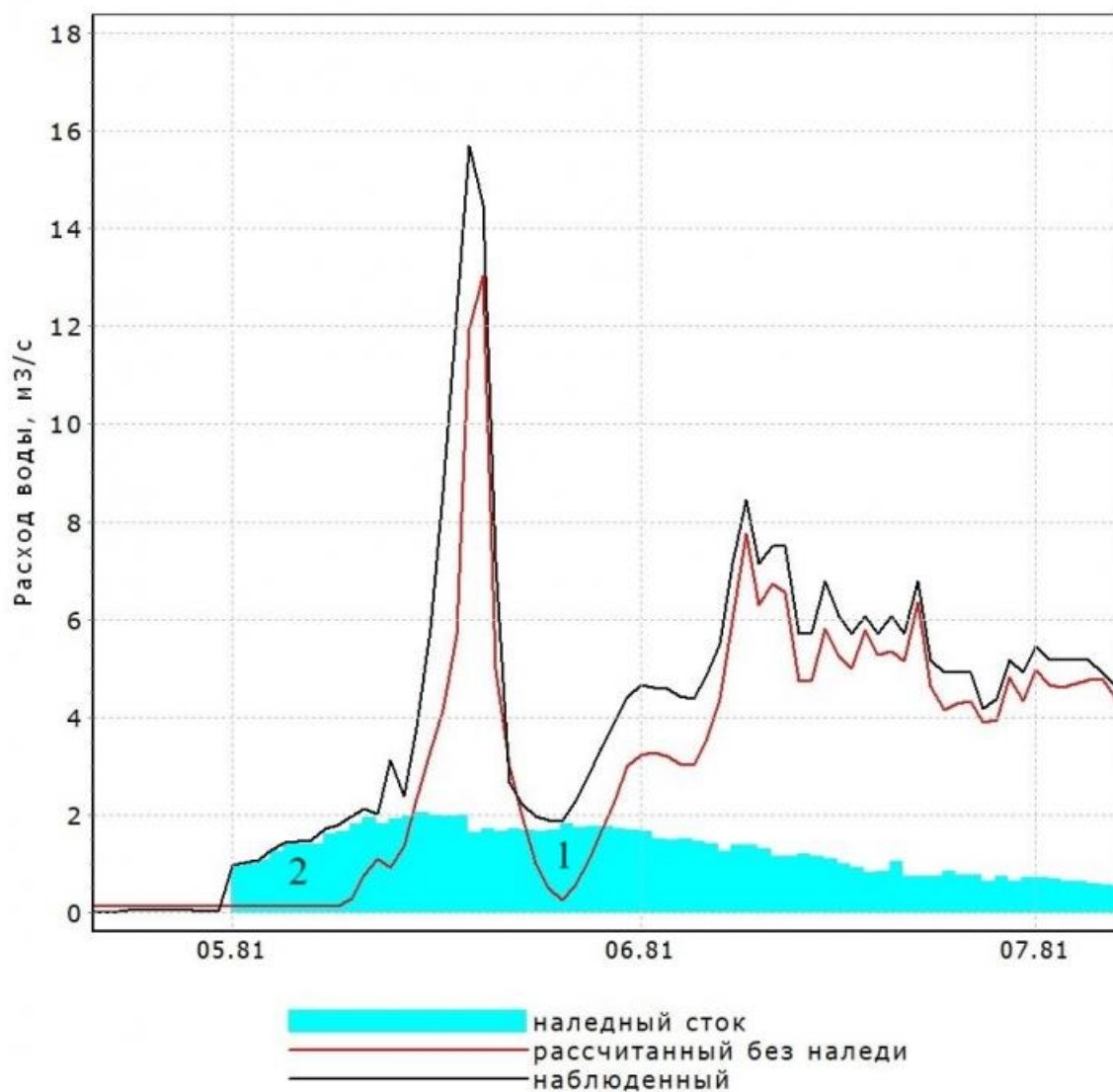


Рис. 6. Рассчитанный общий и наледный сток р. Анмангында в период половодья, 1981 г.
 Области 1 и 2 — доля наледного стока почти 100%.

Для современного периода на примере 2016 г. также отмечается, что разрушение наледи происходит раньше, чем наблюдается речной сток (рис. 7). Слой речного стока в этом году был 251 мм, вклад наледи в годовой сток реки составил 9%, а в период весеннего половодья до 19%.

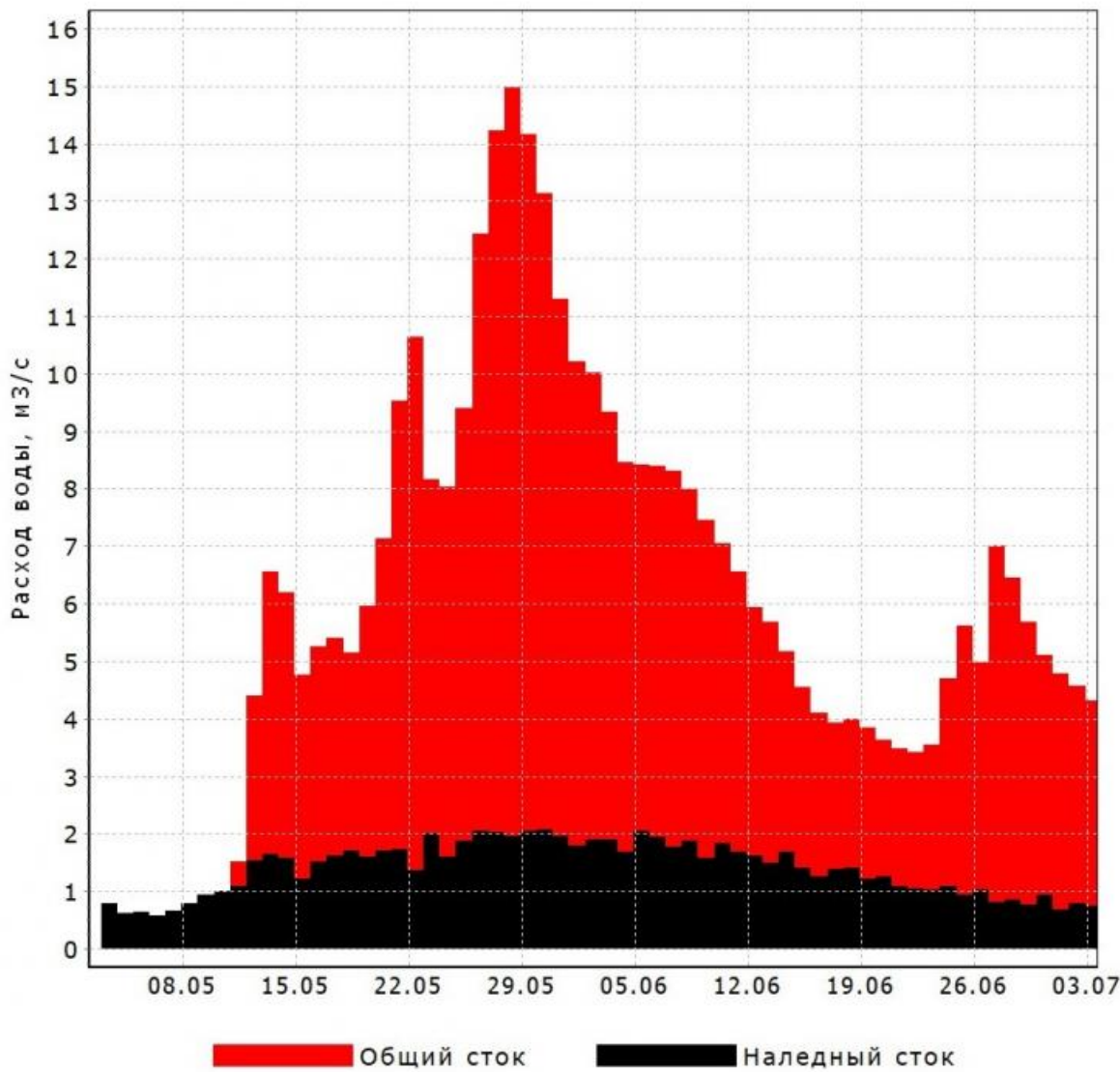


Рис. 7. Рассчитанный общий и наледный сток р. Анмангында в период половодья, 2016 г.

По данным модели «Гидрограф» отмечается значительное изменение величин водного баланса бассейна р. Анмангында в 2000-2022 гг. по сравнению с периодом 1967-1987 гг. Это может быть связано с наблюдающейся трансформацией гидрологического режима рек Северо-Востока страны под влиянием потепления климата [37]. Отмечается, что в современный период годовая величина стока реки Анмангында увеличилась в среднем с 294 мм (1967-1987) до 353 мм (2000-2022 гг.), а максимальные и минимальные значения достигли 600 и 251 мм (табл. 4), ранее они были на уровне — 459 и 163 мм (табл. 3), соответственно.

В том числе, отмечается и уменьшение роли наледного стока в формировании водного баланса реки Анмангында. В 2000-2022 гг. величина наледного стока изменялась от 13,4 до 22,6 мм, что составило от 4 до 9% годового стока реки, а в период весеннего половодья питание за счет наледных вод не превышало 23%.

Таблица 4. Рассчитанный годовой водный баланс (мм) в бассейне р. Анмангында за период 2000-2022 гг.

	Медиана	Среднее	MAX	MIN
Рассчитанный сток, мм	353	354	600	251
Осадки, мм	438	446	699	306

Слой наледного стока, мм	20	20	28	13
Испарение, мм	117	117	134	97

Заключение

Влияние наледей на природную среду изучено еще недостаточно из-за отсутствия длительных рядов наблюдений. По этой же причине не разработаны методы прогноза и учета наледей в водном балансе рек, хотя на некоторых реках их вклад сопоставим с ледниковым стоком. В данном исследовании предложен алгоритм расчета наледного стока, который зависит от максимальных размеров наледи (до начала ее таяния), коэффициентов таяния и испарения, эффективных температуры и дефицита влажности, а также относительной величины сокращения площади льда с течением времени. Алгоритм получил название блок «Наледь» и был внедрен в модель «Гидрограф», которая неоднократно применялась для расчета стока рек горной криолитозоны, как обеспеченных, так и не обеспеченных данными наблюдений.

Расширение функциональных возможностей модели «Гидрограф» за счет введения нового блока «Наледь» позволило учесть влияние наледных явлений на сток рек на суточном интервале, что представляет важное значение для понимания процессов водообмена в криолитозоне. Апробация алгоритма проведена для р. Анмангында. Установлено, что при его использовании величина ошибки расчета годового стока реки составила 13%, уменьшившись на 5% (ранее 18%). Критерий Нэша-Сатклиффа улучшился и составил в среднем 0,57 (ранее 0,41).

Результаты численных расчетов, проведенных с использованием обновленной версии модели «Гидрограф», выявили изменения во вкладе Анмангындинской наледи в сток реки в различные периоды. Так, в 2000-2022 гг. за счет сокращения максимальных размеров наледи и увеличении речного стока наблюдается уменьшение влияния наледи на сток, что имеет важное значение для понимания динамики водных ресурсов криолитозоны. Предложенный алгоритм позволяет детализировать водный баланс, что актуально для более точных расчетов гидрологических характеристик и прогноза опасных гидрологических явлений.

Наконец, стоит отметить, что, несмотря на незначительный объем наледного стока, его роль в экосистеме в периоды летней межени в засушливые годы может стать критической. Это обстоятельство подчеркивает не только значимость проведенных исследований с точки зрения гидрологии, но и их вклад в понимание экологических процессов в регионах, где распространены многолетнемерзлые породы. Тем не менее, детальное понимание формирования, распределения и влияния наледей требует комплексного исследования, включая данные о климате, гидрографии и геологии конкретного региона.

Благодарности

Авторы искренне благодарят Главу Тенькинского муниципального округа Магаданской области Дениса Анатольевича Ревутского за помощь в проведении исследований и обеспечении работы научной группы на территории округа.

Библиография

1. Morse P., Wolfe S. Long-Term River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic Canadian Shield: River icing dynamics in discontinuous permafrost, subarctic

- Canada // *Permafr. Periglac. Process.*, 2016, 28, P. 580–586.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1907>.
2. *Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M.* Distribution and relevance of Aufeis (icing) in the upper Indus Basin // *Science of The Total Environment.*, 2021, 780, P. 146604.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146604>.
 3. Алексеев В.Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лёд и снег. 2016. Т. 56. № 1. С. 73–93.
 4. Гляциологический словарь / В.М. Котляков, В.Р. Алексеев, Н.В. Волков и др.; ред. В.М. Котляков. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
 5. *Morse P., Wolfe S.* Geological and meteorological controls on icing (aufeis) dynamics (1985 to 2014) in subarctic Canada // *Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, 120, P. 1670–1686. <https://doi.org/10.1002/2015JF003534>.
 6. Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Землянскова А.А., Осташов А.А. Оценка объемов наледей в бассейне реки Индигирка // Метеорология и гидрология. 2022 №3. С. 81 – 90. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-3-81-90
 7. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. Под ред. В.А. Всеволожского. Москва: Изд-во МГУ, 1983. 232 с.
 8. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России / В.Р. Алексеев, О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, Н.В. Нестерова, А.А. Осташов, А.А. Землянскова; ред. В.В. Шепелев, М.Н. Железняк. Новосибирск: СО РАН, 2021. 302 с. ISBN 978-5-6046428-2-5
 9. Пигузова В.М. Оценка подземного стока в реки зоны многолетней мерзлоты // Тр. ГГИ. Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. Вып. 122: Исследование подземного стока в реки. С. 87–107.
 10. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток / Б.Л. Соколов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 190 с.
 11. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования / М.Л. Марков, Н.Г. Василенко, Е.В. Гуревич. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2017. 320 с.
 12. *Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M.* Spatial and temporal dynamics of aufeis in the Tso Moriri basin, eastern Ladakh, India // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2022, 34, 10.1002/ppp.2173. <https://doi.org/10.1002/ppp.2173>.
 13. *Wanty R., Wang B., Vohden J., Day W., Gough L.* Aufeis accumulations in stream bottoms in arctic and subarctic environments as a possible indicator of geologic structure: Chapter F in Recent U.S. Geological Survey studies in the Tintina Gold Province, Alaska, United States, and Yukon, Canada-results of a 5-year project. *Scientific Investigations Report* (2007): 13 p.
 14. *Terry N., Grunewald E., Briggs M., Gooseff M., Huryn A.D., Kass M.A., Tape K.D., Hendrickson P., Lane Jr J.W., Hendrickson P., Lane J.W.* Seasonal Subsurface Thaw Dynamics of an Aufeis Feature Inferred from Geophysical Methods // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(3).
<https://doi.org/10.1029/2019jef005345>.
 15. *Seibert J., Vis M.J.P.* Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2012, 16, P. 3315–3325, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>.
 16. *Seibert J., Vis M., Lewis E., van Meerveld I.* Upper and lower benchmarks in hydrological modeling // *Hydrological Processes*, 2018, 32. 10.1002/hyp.11476.
 17. *Koboltschnig G.R., Schöner W., Zappa M., Kroisleitner C., Holzmann H.* Runoff

- modelling of the glacierized Alpine Upper Salzach basin (Austria): multi-criteria result validation // *Hydrol. Process.*, 2008, 22, 3950–3964, <https://doi.org/10.1002/hyp.7112>.
18. *Hülsmann L., Geyer T., Schweitzer C., Priess J., Karthe D.* The effect of subarctic conditions on water resources: initial results and limitations of the SWAT model applied to the Kharaa River Basin in Northern Mongolia // *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2), P. 581–592. doi:10.1007/s12665-014-3173-1
19. *Gagarin L., Qingbai W., Melnikov A., Volgusheva N., Tananaev N., Jin H., Zhang Z., Zhizhin V.* Morphometric analysis of groundwater icings: Intercomparison of estimation techniques // *Remote Sensing.*, 2020, 12(4), P. 692. doi:10.3390/rs12040692.
20. *Makarieva O., Nesterova N., Ostashov A., Zemlyanskova A., Tumskoy V., Gagarin L., Ekaykin A., Shikhov A., Olenchenko V., Khristoforov I.* Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia // *Vestnik of SPbSU. Earth Sciences*, 2021, 66(1). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>.
21. *Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В.* Первые результаты применения георадарной съемки для изучения строения наледей в долине р. Кюбюме (Оймяконское нагорье) // Сборник материалов конференции Инженерная и рудная геофизика, Санкт-Петербург, 2023. С. 136-141.
22. *Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A., Zemlianskova A., Luo D., Ostashov A., Alexeev V.* Giant Aufeis—Unknown Glaciation in North-Eastern Eurasia According to Landsat Images 2013–2019 // *Remote Sens.*, 2022, 14, P. 4248. <https://doi.org/10.3390/rs14174248>.
23. *Соколов Б.Л., Саркисян В.О.* Подземное питание горных рек / Б.Л. Соколов, В.О. Саркисян. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 239 с.
24. *Толстихин О.Н.* Налеги и подземные воды северо-востока СССР / О.Н. Толстихин; ред. С.М. Фотиев. Новосибирск: Изд-во Наука, 1974. 164 с.
25. *Букаев Н.А.* Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колымы (на примере Анмангындинской наледи) // В кн. «Налеги Сибири». М.: Наука, 1969. С. 62–78.
26. *Абрамов Д.А., Макарьева О.М., Землянкова А.А., Осташов А.А., Нестерова Н.В.* Развитие сети геокриологического мониторинга Магаданской области: первые результаты 2021–2022 гг. // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии России», Иркутск 23–25 ноября 2022 г. Отв. редактор Е.Н. Сутырина. Иркутск, 2023. С. 119–126.
27. *Землянкова А.А., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В., Макарьева О.М.* Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // *Лед и снег*. 2023. Т. 63. № 1. С. 71–84. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010167>
28. *Zemlianskova A., Makarieva O., Shikhov A., Alekseev V., Nesterova N., Ostashov A.* The impact of climate change on seasonal glaciation in the mountainous permafrost of North-Eastern Eurasia by the example of the giant Anmangynda aufeis // *Catena*. – 2023. – P. 107530. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107530>
29. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Вып. 17. Бассейны рек Колымы и рек Магаданской области. 1976 – 1980 гг. // Колымское управление гидрометеорологической службы. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
30. *Осташов А.А., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Землянкова А.А.* Методика

мониторинга наледей с помощью БПЛА // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. Под редакцией Р.Г. Мотенко. Москва, 2022. С. 294-299.

31. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа) / Ю.Б. Виноградов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
32. *Лебедева Л.С.* Формирование речного стока в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири. Дис.канд. геогр. наук. Москва: Из-во Института географии РАН, 2018. 125 с.
33. *Нестерова Н.В.* Моделирование гидрологических характеристик бассейнов горных рек России различной степени изученности в современном климате. Дис. ... канд. техн. наук: 1.6.16. Санкт-Петербург, 2022. 177 с.
34. *Васильев А.И.* Современное состояние ландшафтов водосборного бассейна реки Анмангында // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М.И. Сумгина. Якутск, 2022. С. 182-186.
35. *Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А.* Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 178-186.
36. Отчет по результатам воднобалансовых исследований с наледной составляющей в бассейне р. Анмангынды. Магадан: Изд-во Колымское управление гидрометеорологической службы, 1977 г. 62 с.
37. *Makarieva O.M.; Nesterova N.V.; Post D.A.; Sherstyukov A.; Lebedeva L.* Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. Cryosphere, 2019, 13, 1635-1659

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, прогноз гидрологических процессов и моделирование процессов формирования стока рек горной криолитозоны северо-востока России с наледным питанием на примере р. Анмангында (впадает в р. Детрин, приток р. Колыма).

Методология исследования, в статье указаны как анализ исторических данных с использованием аналитических методов информации о гидрологическом режиме на основе работы материалов колымского управления гидрометеослужбы, сбором, оцифровкой и анализом за тридцатилетний период, использование карты, литературных данных и фондовых материалов. Из анализа статьи можно сделать вывод о использовании методов оценки современной площади наледи на основе анализа космических снимков спутников Landsa за двадцатилетний период, статистического анализа, климатологический анализ с построением связей между метеорологическими характеристиками и интенсивностью гидрологических процессов.

Актуальность затронутой темы безусловна и состоит в получении информации о наледи как специфической форме сезонного оледенения, характерная для горных условий

многолетней мерзлоты являясь ключевым элементом в цепи водообменных процессов зоны распространения многолетнемерзлых пород формирует в мае-июне 50-90% наледного стока в речной сток, в июле доля доходит до 30%, а в августе - до 7%. Гидрологическая роль наледей в формировании речного стока может быть сопоставима с такими снежно-ледовыми явлениями, как ледники. В этой связи исследования режима питания в частности и гидрологического режима в целом в зависимости от условий формирования, депонирования и таяния наледи является важным аспектом понимания геоэкологического механизма гидрологических динамических процессов.

Исследования автора статьи помогают решить проблему разработки математического аппарата, позволяющего прогнозировать размеры и характер наледных процессов, а также учитывать их влияние на речной сток и другие компоненты природной среды кроется в том, что отсутствует государственная программа изучения наледей.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований и динамики максимальных размеров наледи и увеличении речного стока с уменьшением влияния наледи на сток как важное значение для понимания динамики водных ресурсов криолитозоны. Это является важным дополнением в развитии геокриологии.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс картографического моделирования. Статья иллюстрирована визуализированными формами карты и фотографии.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по геохимическому анализу особенности грунтов.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.