

На правах рукописи



Землянскова Анастасия Александровна

**ОЦЕНКА НАЛЕДНЫХ РЕСУРСОВ И ИХ РОЛИ В ФОРМИРОВАНИИ СТОКА РЕК
МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Научный руководитель: Макарьева Ольга Михайловна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет; ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга и прогноза климата и окружающей среды Северо-Восточного государственного университета

Официальные оппоненты: **Болгов Михаил Васильевич**, д.т.н., зав. лабораторией моделирования поверхностных вод, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва.

Гармаев Ендон Жамьянович, д.г.н., чл. корр. РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Улан-Удэ.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «10» октября 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных и экологических проблем СО РАН и на сайте www.iwep.ru.

Отзывы на автореферат (в электронном виде и на бумажных носителях в двух экземплярах, заверенных подписью и печатью) просим направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1, Диссертационный совет, факс: (385-2) 24-03-96, e-mail: iwep@iwep.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.039.01



д.г.н., доцент
Ирина Дмитриевна Рыбкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Потепление климата приводит к трансформации гидрологического цикла криолитозоны, включая изменения геокриологических условий, процессов водообмена подземных вод, формирования поверхностного стока. Наледи влияют на взаимодействие поверхностного и подземного стока, являются важнейшим элементом в цепи водообменных процессов зоны распространения мерзлоты. Из-за своих крупных размеров они хорошо идентифицируются на космических снимках, что позволяет использовать наледи в качестве индикаторов происходящих изменений гидрологического режима на обширных, труднодоступных и малоизученных территориях Северо-Востока страны. Изучение наледей актуально не только с научной точки зрения, но и с практической. Наледи относятся к опасным природным процессам и представляют угрозу для инженерных сооружений. В связи с активным освоением Магаданской области, богатой запасами стратегически значимых минеральных ресурсов, возникла потребность региональной оценки развития наледных явлений, в том числе их роли в формировании поверхностного стока рек.

Объектом исследования являются наледи подземных вод на территории Магаданской области, и, в том числе, гигантская Анмангындинская наледь, ежегодно формирующаяся в верховьях бассейна р. Колымы и являющаяся репрезентативной для горной территории Северо-Востока России. **Предметом исследования** являются процессы формирования и разрушения наледей, их влияние на речной сток, и методы их мониторинга и математического моделирования.

Цель работы – выявление закономерностей распространения и развития наледей подземных вод на территории Магаданской области, расчет наледных ресурсов региона и оценка их вклада в процессы формирования стока рек на основе авторской методики расчета наледной составляющей стока.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ исторических и современных подходов к исследованию наледных процессов, в том числе численных оценок характеристик наледей, таких как площадь, объем и толщина льда.
2. Провести расчет характеристик Анмангындинской наледи, как репрезентативного объекта горной криолитозоны Северо-Востока России, выявить их динамику за период 1962–2022 гг. и оценить роль климатических и геокриологических факторов в изменении режима наледообразования.

3. Восстановить режимные и специальные наблюдения за гидрологическими, геокриологическими и другими компонентами природной среды горного бассейна р. Анмангында на комплексном научном полигоне «Анмангындинская наледь» для получения фактического материала.

4. Разработать каталог наледей Магаданской области на основе дешифрирования космических снимков, сформировать базу данных о местоположении и размерах наледей, результаты представить в виде карты.

5. Оценить наледные ресурсы Магаданской области на основе разработанного каталога наледей, региональных коэффициентов и номограмм, а также проанализировать какую долю составляет наледное питание в стоке рек Магаданской области.

6. Разработать методику моделирования процессов формирования стока в бассейнах рек с наледным питанием, включить ее в гидрологическую модель «Гидрограф», провести верификацию и апробацию метода.

Научная новизна исследования:

1. Для Анмангындинской наледи, репрезентативной для территории Северо-Востока России, разработана база данных морфометрических характеристик наледи, объединяющая результаты многолетних наземных и спутниковых наблюдений за период с 1962 по 2022 гг.

2. На основе исторических данных и собственных полевых материалов актуализированы параметры расчетных формул для оценки наледных ресурсов и вклада наледей в формирование стока рек.

3. Впервые с 1958 года по многолетним космическим данным создана актуальная картографическая база данных наледей подземных вод на территории Магаданской области и определены их основные характеристики.

4. С помощью блока «Наледь», разработанного автором, расширены возможности гидрологической модели «Гидрограф» воспроизводить переменные состояния водосбора и гидрографы речного стока в бассейнах рек с наледным питанием.

Степень достоверности и апробация результатов. В работе использовались архивные данные специальных наблюдений и гидрометеорологического мониторинга сети Росгидромета, данные дистанционного зондирования Земли, а также материалы собственных полевых исследований на объектах Магаданской области. Результаты работы интерпретированы с учетом достижений мировой науки в рассматриваемой области.

Методология и методы исследования. Распределенная детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф» применялась для математического моделирования

процессов формирования стока. Данные дистанционного зондирования Земли (космические снимки Landsat, Sentinel-2 и снимки с беспилотного летательного аппарата) применялись для актуализации сведений о распространении и характеристиках наледей. Материалы собственных режимных и специальных наблюдений на объектах Магаданской области использовались для актуализации параметров расчетных формул, а также параметризации гидрологической модели «Гидрограф». Все приведенные картосхемы были построены в среде ArcGIS.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что за период с 1962 по 2022 гг. наблюдается статистически значимое снижение площади и объема гигантской Анмангындинской наледи (репрезентативной для Северо- Востока России), которое обусловлено главным образом климатическими факторами – увеличением количества осадков и повышением температуры воздуха в начальный период формирования наледи (в ноябре-декабре).

2. Составленный каталог наледей подземных вод на территории Магаданской области создан на основе космических снимков Landsat, отражает современное состояние наледных ресурсов региона с указанием их местоположения и площади.

3. Выявлено, что наледные процессы оказывают влияние на внутригодовое распределение стока рек Магаданской области: на наледный сток приходится до 12% годового объема речного стока, потери речного стока на образование наледей в зимний период составляют от 2 до 100%, а также на некоторых объектах запасы наледных вод в несколько раз превышают величину зимнего стока. Общий объем наледных ресурсов составляет 1.35 км³.

4. На основе разработанного блока «Наледь» усовершенствована гидрологическая модель «Гидрограф», которая позволяет учитывать приток воды от таяния и разрушения наледного льда в задачах расчета гидрологических характеристик поверхностного стока рек.

Практическая и теоретическая значимость проведенных исследований.

Для труднодоступных регионов, не обеспеченных гидрометеорологическими данными, наледи являются индикаторами изменения климата. Многолетнюю и внутригодовую динамику характеристик наледи можно оценить по данным дистанционного зондирования Земли.

Теоретическая значимость работы состоит в изучении механизмов взаимодействия подземных и поверхностных вод в горной криолитозоне в современном климате, а также

актуализации сведений Кадастра наледей, выпущенного в 1958 г., о распространении и характеристиках наледей Магаданской области.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования актуальных данных о распространении наледей и предложенной методики расчета стока рек с наледным питанием для прогноза опасных природных явлений, к которым относятся как сами наледи, так и неблагоприятные для многих отраслей хозяйства фазы водного режима (половодье, паводки и др.). Результаты исследования внедрены в практическую деятельность дорожного хозяйства и организаций Магаданской области.

Впервые за 30 лет на Северо-Востоке России на примере бассейна р. Анмангынды были проведены комплексные исследования процессов формирования стока, динамики многолетнемерзлых пород и процессов наледообразования. Данные исследований являются актуальными в связи с задачами разработки мер адаптации региона к изменению климата и необходимости прогноза опасных природных явлений.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в данной работе, получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии в коллективе соавторов. Параметризация наледных процессов в модели Гидрограф, гидрологическое моделирование и верификация модели проводились автором самостоятельно. С 2020 года автором совместно с коллективом выполняются полевые исследования процессов водообмена горной криолитозоны в бассейне р. Анмангынды.

Апробация работы. Основные положения и результаты доложены автором на следующих международных и российских конференциях: Международная научно-практическая конференция памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «Пятое Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен» (Санкт-Петербург, Россия, 9–14 октября 2023 г.); The "International Cold Region Development Conference", 14–16 July, 2023. China; Инженерная и рудная геофизика 2023, 15–19 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург; ISAR-7 Seventh International Symposium on Arctic Research, March 6–10, 2023. Tachicawa, Japan; Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г.; EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022; Международная конференция для молодых ученых и аспирантов «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению» памяти выдающегося российского гидролога Ю. Б. Виноградова (Санкт-Петербург, Россия, 7–9 декабря 2020 г.). По результатам перечисленных конференций опубликованы тезисы.

Результаты диссертационного исследования нашли отражение при выполнении проектов РГО «Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России», РГО «Водные ресурсы Северо-Востока России в условиях региональных и глобальных изменений», РФФИ 20-05-00666А, РФФИ БРИКС_т 19-55-80028, проект Санкт-Петербургского государственного университета (2021–2023 гг.) «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата»; региональный проект РНФ и Правительства Магаданской области 23-17-20011.

Публикации. По теме диссертационной работы автором опубликовано лично и в соавторстве 11 статей в рецензируемых изданиях, из них 2 – в журналах, рекомендованных ВАК, 9 – в изданиях, входящих в системы цитирования Scopus или WOS. Также получено 4 свидетельства о государственной регистрации баз данных. Издана монография в соавторстве «Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 124 страницы. Текст исследования иллюстрирован 40 рисунками и 17 таблицами. Список использованных источников включает 169 наименований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю О.М. Макарьевой, а также сотрудникам кафедры гидрологии суши Санкт-Петербургского государственного университета. Благодарю за совместную работу д.г.н. А.Н. Шихова (Пермский государственный национальный исследовательский университет), А.А. Осташова, к.т.н. Н.В. Нестерову (Санкт-Петербургский государственный университет) и к.г.-м.н. В.В. Оленченко (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук), всех, кто принимал участие в полевых работах на полигоне «Анмангындинская наледь». Выражаю искреннюю благодарность профессору, д.г.н. В.Р. Алексееву (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН). Благодарю за поддержку на разных этапах жизненного пути семью Землянских и Е.А. Ахрамеева. За содействие и оказанную помощь в организации полигона «Анмангындинская наледь» и проведении научно-популярных мероприятий в пос. Усть-Омчуг выражаю благодарность Главе Тенькинского муниципального округа Д.А. Ревутскому и первому заместителю Главы Е.Ю. Ребровой.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* описывается общая характеристика работы, формулируются актуальность, цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, приводятся научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и апробация результатов.

В *Главе 1* освещается история изучения наледей (*Раздел 1*), выделены основные методы и проблемы изучения наледных процессов (*Раздел 2*), описывается их изменчивость во времени и пространстве (*Раздел 3*).

Наледь – это слоистый ледяной массив на поверхности земли, льда или инженерных сооружений, образовавшийся при замерзании периодически изливающихся природных или техногенных вод (*Гляциологический словарь ...*, 1984). Выделяют речные, подземные, техногенные наледи и др. Они широко распространены в арктических регионах (Канада, Аляска, Россия) и в высокогорьях (Тибетское нагорье, Гималаи, Тянь-Шань), их размеры могут изменяться от нескольких квадратных метров до десятков квадратных километров. В зависимости от связи наледи с таликами будет изменяться межгодовая и внутригодовая динамика, а также морфометрические характеристики и связь наледи с климатическими факторами.

Систематическое изучение наледей началось спустя 100 лет после первых описаний наледных явлений, выполненных для территории Восточной Сибири в середине 19 века. Первая крупномасштабная работа по картографированию наледей была проведена на Северо-Востоке СССР. А.С. Симаковым и З.Г. Шильниковской в 1958 г. были опубликованы «Карта и кадастр наледей Северо-Востока СССР». Эти материалы легли в основу расчетов характеристик наледей, подземного и речного стока, которые используются как в научных исследованиях, так и практических целях до сих пор.

Современные исследования наледей проводятся на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые позволяют анализировать состояние и динамику ледяных объектов в труднодоступных районах (Атлас, 2021). Многочисленные работы российских и зарубежных авторов, основанные на результатах полевых наблюдений и данных ДЗЗ, свидетельствуют о перестройке природной системы – сокращении площади и изменении внутригодового режима наледей на фоне изменения климата. На настоящий момент не решен вопрос о методах прогноза наледных явлений и определения толщины и объемов льда дистанционными методами.

В *Главе 2* представлены основные сведения о физико-географических условиях полигона Анмангындинская наледь (*Раздел 1*), истории развития сети наблюдений

наледных процессов (*Раздел 2*), а также материалы и методы, используемые при выполнении диссертационного исследования (*Раздел 3*). В *Разделе 4* описывается изменение гидроклиматических и геокриологических условий, а также их влияние на процессы наледообразования.

Анмангындинская наледь расположена в бассейне р. Анмангында в районе 155–159 км Тенькинской трассы (Магаданская обл.) в 30 км к юго-востоку от пос. Усть-Омчуг. Максимальные размеры наледи могут достигать около 7 км² по площади и более 10 млн. м³ в объеме. По природно-климатическим условиям речной бассейн, в котором формируется Анмангындинская наледь, является репрезентативным для горных ландшафтов Северо-Востока России (Толстихин, 1974). Для анализа динамики роста и таяния наледи, межгодовой и внутригодовой динамики ее площади и объема были использованы данные специальных наблюдений Колымского управления гидрометеорологической службы, проводившихся на Анмангындинской наледи в период 1962–1991 гг., данные космических снимков Landsat (2000–2017 гг.) и Sentinel-2 (2018–2023 гг.), а также материалы собственных полевых работ (2020–2023 гг., Рис. 1).

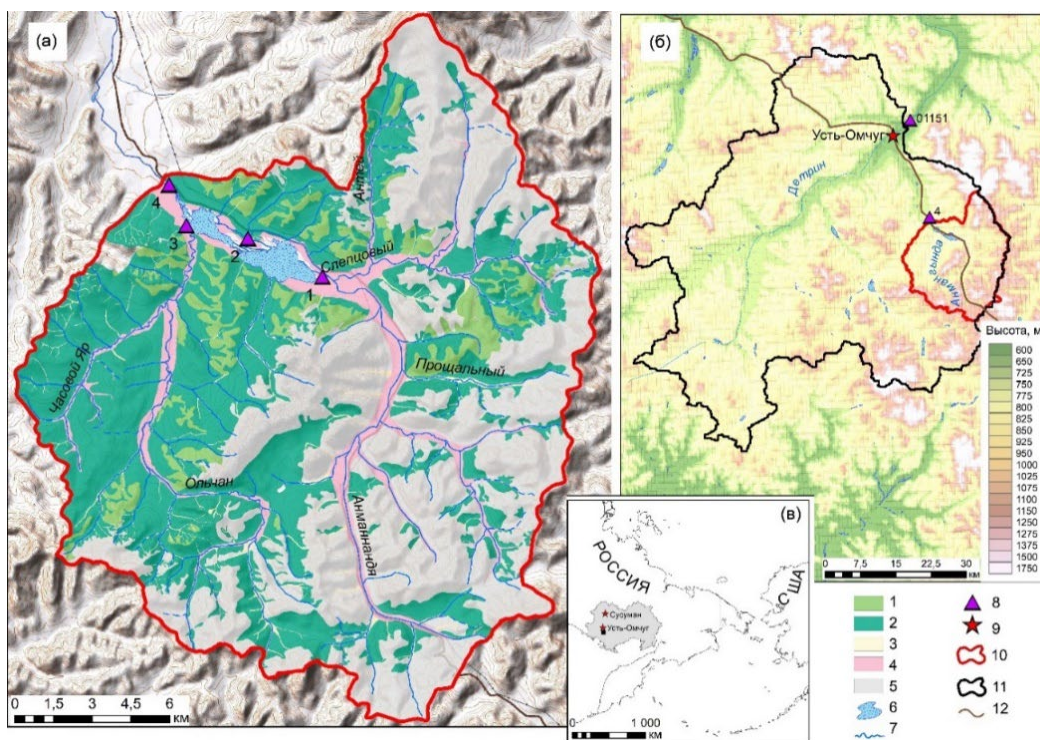


Рис. 1. Ландшафтная карта бассейна реки Анмангында (а), его расположение в пределах бассейна реки Детрин (б) и Магаданской области (в).

1 – горная тундра; 2 – горно-склоновый; 3 – редкий лиственничный лес; 4 – речная долина; 5 – каменная осыпь; 6 – наледь; 7 – река; 8 – гидрологический пост: 1 – выше наледи (круглогодичный сток), 2 – в средней части наледной поляны, где наледь не образуется (круглогодичный сток), 3 – ручей Ольчан (приток реки Анмангында, промерзает до дна), 4 – ниже наледи (промерзает до дна); 9 – метеорологическая станция; 10 – граница бассейна р. Анмангында; 11 – граница бассейна р. Детрин; 12 – Тенькинская трасса.

Дешифрирование наледи на космических снимках проводилось на основе расчета нормализованного дифференциального снежного индекса NDSI (1):

$$\text{NDSI}=(\text{GREEN}-\text{SWIR1})/(\text{GREEN}+\text{SWIR1}) \quad (1),$$

где SWIR1 – коэффициент отражения в среднем инфракрасном канале (1.56 – 1.66 мкм для снимков Landsat-8), а GREEN – коэффициент отражения в зеленом канале (0.525 – 0.6 мкм для снимков Landsat-8). Пороговое значение NDSI, по которому происходит выделение снежно-ледовых поверхностей, принимается равным 0.4 (Hall et. al., 1995).

Проведена детальная верификация результатов: уточнены контуры наледей, исключен ледовый и снежный покров, прилегающий к ним. Выполнено объединение наледей в единый объект, который на снимках за летний период разделен на несколько частей. Максимальная неопределенность в оценке площади могла составить 1.11 км² по снимкам Landsat и 0.74 км² по снимкам Sentinel-2, соответственно, то есть отклонение 15–20% от фактической площади наледи.

Оценка объема наледи в современный период (2000–2022 гг.) проведена по формуле Б.Л. Соколова (1975) $W=aS^n$, описывающей связь объема наледи (W , тыс. м³) с ее площадью (S , тыс. м²) с учетом региональных коэффициентов a и n , которые характеризуют толщину льда (м). Для Анмангындинской наледи региональные коэффициенты были получены автором на основе данных наземных наблюдений 1963–1990 гг. и составили $a = 0.364$, $n = 1.167$. Отклонение расчетных значений объема наледи от наблюдаемых в среднем составило 10%. В разные годы абсолютная погрешность варьировалась от 12.8 до 2094.2 тыс. м³ или от 0 до 5 мм слоя воды.

По данным ближайших метеорологических станций и гидрологических постов был проведен анализ климатических и геокриологических условий района за период 1967–2022 гг. и режима р. Анмангынды в створе ниже наледи (1962–1987 гг.).

Результаты показали, что за последние 60 лет максимальные размеры наледи до начала таяния сократились на 14.8% и 17.4% для площади и объема соответственно. Так, в исторический период (1963–1990 гг.) площадь наледи изменялась от 4.3 до 6.8 км², а объем от 5.3 до 11.7 млн м³. В 2000–2022 гг. величина площади варьировалась в пределах 3.5–5.4 км², а рассчитанный объем мог составлять 5.0–8.2 млн м³. Внутригодовая динамика наледи также изменилась. В настоящее время наледь полностью разрушается к августу-сентябрю, а ранее 4-10% от максимальной площади сохранялось и включалось в формирование наледи на следующий год. Период таяния в среднем сократился на 34 дня.

Температура воздуха и количество осадков в регионе повысились. Наибольшие изменения произошли в предзимний период. Снежный покров устанавливается раньше и его мощность больше. Связь метеорологических условий современного периода (2000–2022 г.), таких как средняя температура воздуха в ноябре-декабре и сумма осадков за тот же период, с площадью наледи подтверждается средней корреляцией (–0.58 и –0.53, соответственно), достоверность 95% (Табл. 1).

Таблица 1. Ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между метеорологическими условиями и максимальными размерами Анмангындинской наледи ($p=0.05$)

Период	Характеристика наледи	Средняя температура воздуха				Сумма осадков	
		X–XI	XI–XII	VIII–XI	Годовая	X–XI	XI–XII
1962–1990	Объем	–0.45	–0.09	–0.57	–0.25	–0.72	–0.41
1962–1990	Площадь	–0.48	0.06	–0.54	–0.08	–0.34	–0.48
2000–2022	Площадь	–0.44	–0.58	–0.53	–0.47	–0.25	–0.53

* жирным шрифтом отмечена статистически значимая ($p=0.05$) корреляционная связь.

В *Главе 3* приведено краткое описание физико-географических условий Магаданской области (*Раздел 1*), методы оценки наледных ресурсов (*Раздел 2*), результаты анализа вклада наледного стока в сток рек Магаданской области, а также картирования полученных данных (*Раздел 3*).

На основе сведений о современном местоположении и площади наледей, определенных по космическим снимкам Landsat (2013–2019 гг.) с помощью метода, описанного в *Главе 2*, разработаны карты наледности Магаданской области.

Космические снимки были отобраны за разные даты в период май-июнь, что обусловлено наличием облачности или снежного покрова, затрудняющими дешифрирование наледей. Для компенсации фактора использования снимков в течение периода, когда площадь и объем некоторых наледей мог уменьшиться, было проведено уточнение площади наледей с целью приведения величин к максимальным значениям, наблюдаемым в период перед началом таяния. За основу был взят метод расчета уменьшения относительных значений площадей Анмангындинской наледи (2000–2022 гг.) в течение теплого периода года в зависимости от числа дней после начала таяния для наледей площадью 0.6–23 км² (Рис. 2). Для уточнения площадей наледей меньше 0.6 км² использовались кривые, предложенные Б.Л. Соколовым (1975).

На основе полученных данных о максимальной площади наледей и региональных коэффициентов $a = 0.364$, $n = 1.167$, определенных по материалам 1963–1990 гг. на

Анмангындинской наледи, был выполнен расчет наледных ресурсов (объема льда, км³) Магаданской области.

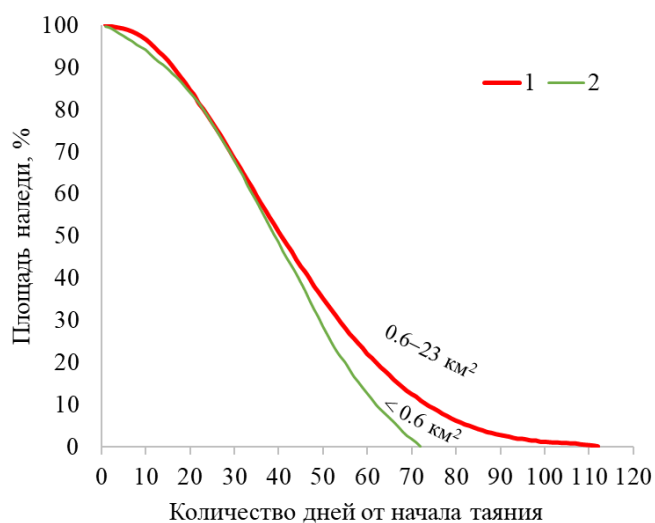


Рис. 2. Номограммы для определения относительной площади наледи подземных вод в зависимости от числа дней после начала ее разрушения.

1 – кривая, разработанная автором на основании анализа современных данных.; 2 – кривая Б.Л. Соколова (1975).

По данным Кадастра (1958) в Магаданской области насчитывалось 1820 наледей с суммарной площадью наледных полей 1686 км², по современным снимкам Landsat (2013–2019 гг.) количество учтенных наледей подземных вод увеличилось до 2510, а уточненная по номограммам (Рис. 2) площадь наледей составила 1132.3 км². Наледность водосборов колеблется от 0.15 до 1.40%. Общие наледные ресурсы по скорректированным данным Landsat составляют 2.9 мм или 1.3 км³. На основе полученных материалов рассчитан вклад наледного стока в водный баланс бассейнов рек Магаданской области в различные фазы гидрологического режима (Табл. 2).

Расчет проводился для 23 гидрологических постов (площадь водосбора от 376 км² до 526000 км²), среднемноголетние значения стока рек даны за период 1941–2016 гг. Приток воды от наледей в реки Магаданской области в период весеннего половодья (май–июнь) рассчитывался по номограммам р. Анмангынды, где за 30 дней от начала таяния разрушается около 70% объема льда. Для оценки годового наледного стока принималось, что наледь полностью разрушается и весь объем расходуется на питание реки. Для периода зимней межени определена доля стока, которая расходуется на формирование наледи. Слой наледного стока рассчитывался с учетом плотности льда 870 кг/м³.

Для отдельных рек наледный сток колеблется от 1.4 до 20.7 мм в год, или 0.4–14 % (в среднем 2%). Наледные ресурсы в процентах от зимнего стока рек составляют 2–235% (в среднем 33%). Доля стока весеннего половодья, формирующегося наледными водами, изменяется от 0.6 до 13.6% (в среднем 2.8%). Наибольший вклад наледей в формирование речного стока отмечен для р. Анмангынды – 7% (среднемноголетнее значение) (Рис. 3).

Таблица 2. Наледность частных водосборов Магаданской области и роль наледей в формировании речного стока в различные периоды гидрологического цикла.

Код поста	Река – створ	F, км ²	H, мм	H _{зимн} , мм	H _{пол} , мм	N	S, км ²	W, млн м ³	Z, %	H1, мм	P1, %	P2, %	P3, %
1001	р. Колыма – с. Оротук	42600	228	9.4	92	186	118.6	148.5	0.28	3.0	1.3	32.3	2.6
1010	р. Колыма – пос. Усть-Среднекан	99400	242	25.9	101	557	308.4	373.3	0.31	3.3	1.4	12.6	2.6
1024	р. Аян-Юрях – пос. Эмтегей	9560	215	7.7	96	53	39.1	49.5	0.41	4.5	2.1	58.5	3.7
1050	р. Берелех – пос. Переправа	4980	211	3.6	79	61	38.4	48.6	0.77	8.5	4	235.6	8.6
1095	р. Кулу – с. Кулу	10300	293	17.7	127	47	31.1	39.4	0.30	3.3	1.1	18.8	2.1
1124	р. Тенке (Тенгке) – 2.2 км выше устья р. Нилькоба	1820	257	9.1	128	9	3.4	3.6	0.19	1.7	0.7	19.1	1.2
1144	р. Нелькоба – пос. Нелькоба	2110	339	19.7	165	20	17.6	22.6	0.83	9.3	2.7	47.3	4.5
1151	р. Детрин – устье р. Омчука	3490	323	21.3	142	32	21.9	27.9	0.63	6.9	2.2	32.7	3.9
1152	р. Детрин – устье р. Вахханки	5630	290	16.6	132	39	18.2	20.9	0.32	3.2	1.1	19.5	1.9
1176	р. Бохапча – в 5.4 км от устья	13600	292	14.5	149	104	46.1	53.2	0.34	3.4	1.2	23.5	1.8
1194	р. Дебин – пос. Беличье	3460	276	6.5	141	26	8.2	8.4	0.24	2.1	0.8	32.5	1.2
1238	р. Таскан – пос. Усть-Таскан (Таскан 2-й)	9970	215	10.5	115	59	32.3	39.8	0.32	3.5	1.6	33.1	2.4
1293	р. Буюнда – в 3.8 км ниже устья р. Бурката	9090	302	19.5	153	98	29.2	32.1	0.32	3.1	1	15.8	1.6
1341	р.Сугой – в 3.2 км ниже устья р.Омчикчана	5880	304	17.5	157	37	28.5	40.9	0.48	6.1	1.9	34.7	3.1
1342	р.Омникчан – р.п.Омсукчан	1720	293	18.8	136	29	9	9.2	0.52	4.7	1.6	24.9	2.8
1368	р.Омолон – ГМС Лабазная	3710	314	29.4	128	39	18.6	21.5	0.50	5	1.6	17.1	3.2
1521	р.Гижига – в 20 км от устья	11700	409	38.6	226	128	53.2	65.3	0.45	4.9	1.2	12.6	1.7
1556	р.Хасын – пос.Хасын	682	444	40.3	197	8	3.5	4	0.51	5.1	1.2	12.7	2.1
1566	р.Тауй – с.Талон	25100	458	76.0	212	131	43.4	46.7	0.17	1.6	0.4	2.1	0.6
1597	р. Обо – устье р. Бурливая	664	299	13.4	139	16	2.7	2.4	0.41	3.1	1	23.3	1.9
1604	р. Анмангында – Тенькинская трасса, 159-й км	376	288	17.1	107	1	5.1	7.8	1.40	20.7	7.2	121.3	13.6
1801	р.Колыма – г.Среднеколымск	361000	198	19.5	87	1085	555.9	682.4	0.15	1.6	0.8	8.4	1.6
1803	р.Колыма – гидроствор Колымское 1	526000	199	20.2	85	1500	732.1	893.7	0.14	1.4	0.7	7.3	1.4

F – площадь бассейна, H – средний многолетний годовой слой стока, H_{зимн} – слой зимнего стока (октябрь – апрель), H_{пол} – слой стока половодья (май – июнь), N – количество наледей, S – восстановленная площадь наледей, W – объем наледей, рассчитанный по восстановленной площади, Z – наледность бассейна, H1 – наледные ресурсы, P1, P2 и P3 – наледные ресурсы в % от годового, зимнего стока рек и в период весеннего половодья.

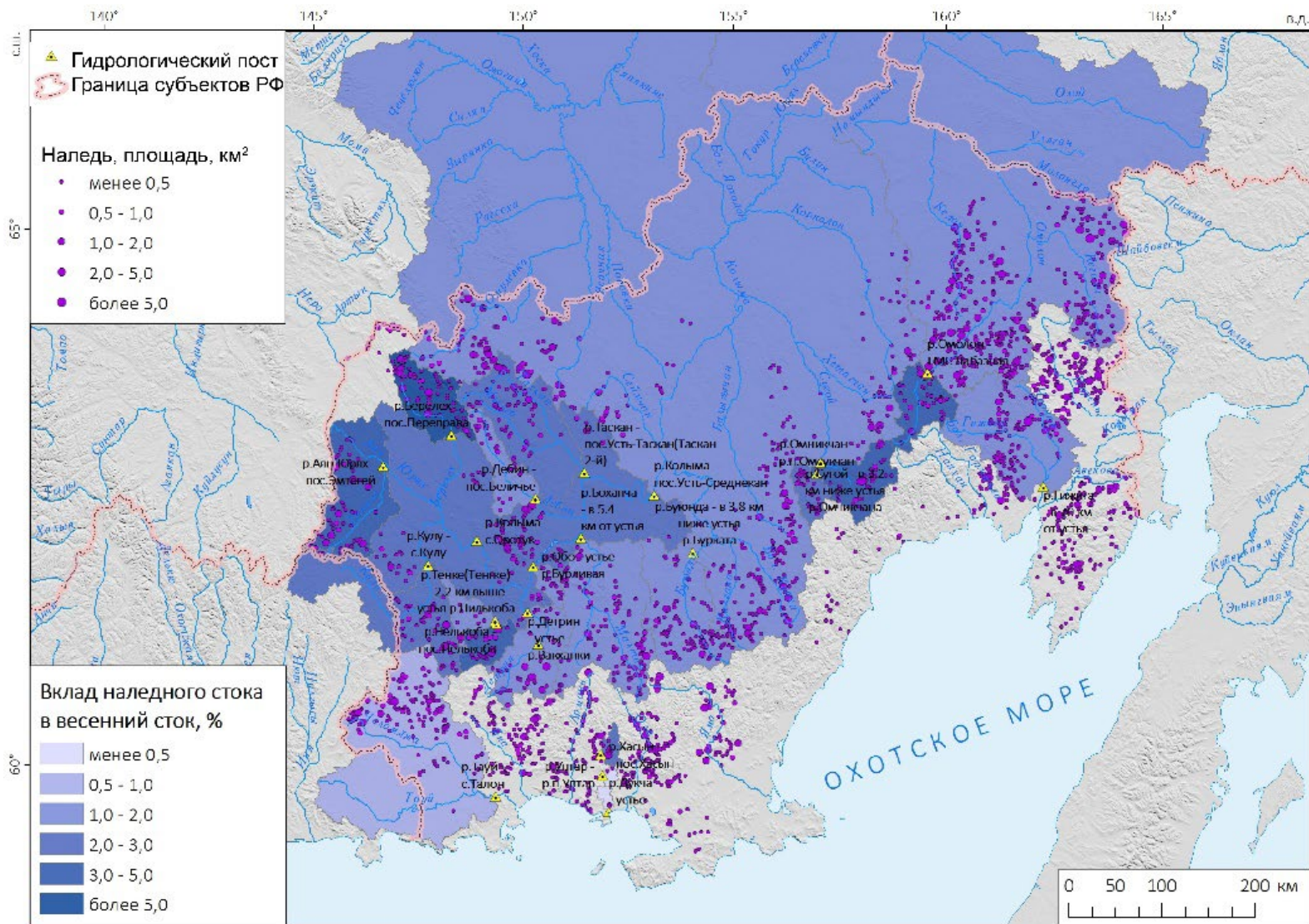


Рис. 3. Вклад наледного стока в сток рек в период весеннего половодья.

В *Главе 4* представлены результаты разработки методики расчета гидрографов стока рек с наледным питанием с расчетным интервалом времени не менее суток на основе гидрологической модели «Гидрограф» на примере бассейна р. Анмангында.

В *Разделе 1* дается краткое описание гидрологической модели «Гидрограф», в *Разделе 2* – информация о разработке блока расчета доли наледного питания в формировании речного стока и валидации результатов на основе данных специальных наблюдений на полигоне Анмангындинская наледь в исторический (1963–1968 гг.) и современный (2020–2022 гг.) периоды. В *Разделе 3* проведена оценка вклада наледного стока в сток реки Анмангында и представлены результаты расчета наледного стока с помощью методов математического моделирования.

С помощью детерминированной модели «Гидрограф» проведена оценка изменения гидрологического режима р. Анмангында. Данная модель уже использовалась в исследованиях и прогнозах гидрологических процессов в зоне мерзлоты и на неизученных речных бассейнах, где показала удовлетворительные результаты. Успешное использование модели «Гидрограф» было продемонстрировано для аналогичных ландшафтов Северо-Востока России, в том числе рек Магаданской области, поэтому параметры модели для водосбора р. Анмангында были заимствованы из этих исследований, а также уточнены на основе данных полевых исследований, проведенных автором.

В бассейне р. Анмангында, как и в бассейнах других рек Магаданской области формируются наледи различной площади, вклад которых в годовой сток рек может достигать 12%, а в период весеннего половодья – 20%. Для учета влияния этого фактора автором был разработан блок «Наледь» (Рис. 4) для модели «Гидрограф», связанный с оценкой объема ледовых явлений, учета вклада наледного стока в сток рек. Он основан на методе расчета таяния наледи под действием солнечной радиации и термоэрозионного разрушения. Входными данными являются площадь наледи к началу теплого сезона, эффективная температура и дефицит влажности воздуха (с учетом прихода солнечной радиации), а также вводится коэффициент таяния льда ($\text{м}/^{\circ}\text{С}\cdot\text{с}$) и испарения со льда ($\text{м}/\text{мбар}\cdot\text{с}$). Результатом являются слои стока и характеристики наледи на заданный интервал.

Введены следующие обозначения: N – номер наледи в пределах РТ-площади; MN – максимальный номер наледи в пределах РТ-площади; T – номер РИВ внутри года; TN_1 – номер РИВ в году G, когда начинается разрушение наледи (определяется по первому РИВ с положительной эффективной температурой воздуха); Temp_{ef} – эффективная температура воздуха; i – порядковый номер расчетного дня.

Параметры: k_t – коэффициент таяния льда ($\text{м}/^\circ\text{С}\cdot\text{с}$); k_e – коэффициент испарения со льда ($\text{м}/\text{мбар}\cdot\text{с}$); кривая уменьшения площади (Рис. 2).

Входные данные на каждый РИВ: $S_{rel_i} = func(T_i)$ – относительная площадь наледи (б/р), однократно вычисляемая величина в зависимости от количества суток от начала таяния; $Temp_{ef}$ – эффективная температура воздуха ($^\circ\text{С}$); Def_{ef} – эффективный дефицит влажности воздуха (мбар);

Входные данные в начале расчета: S_{max} – максимальная площадь наледи (м^2); W_{max} – максимальный объем наледи (м^3); D_{max} – максимальная средняя толщина наледи (м).

Выходные величины на каждый РИВ: W_i – объем наледи (м^3); D_i – средняя толщина наледи (м); S_i – площадь наледи (м^2); E_i – слой испарения с наледи (м); Abl_i – слой стаивания (радиационный) с наледи (м); PI_i – суммарный объем потери льда в i -й РИВ.

Элементы управления: 1) $N = 1$; 2) $N = N + 1$.

Условия: 1) $T \geq T_{N_s}$ и $W_{i-1} > 0$; 2) $Temp_{ef} > 0$; 3) $N = MN$.

Блоки:

1) Испарение с поверхности наледи – рассчитывается изменение толщины наледи в результате испарения с поверхности льда.

$$E_i = Def_{ef} * k_e$$

Если $E_i > D_{i-1}$ $E_i = D_{i-1}$ (если слой испарения превышает толщину льда).

$$D_{1_1} = D_{max} - E_i$$

$$D_{i_1} = D_{i-1} - E_i$$

2) Солнечная радиация – рассчитывается изменение средней толщины наледи за РИВ в результате 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).

$$D_1 = D_{1_1} - Abl_i$$

$$D_i = D_{i-1_1} - Abl_i$$

3) Средняя толщина наледи в случае, если в данный РИВ не происходит таяния под действием солнечной радиации

$$D_i = D_{i-1}$$

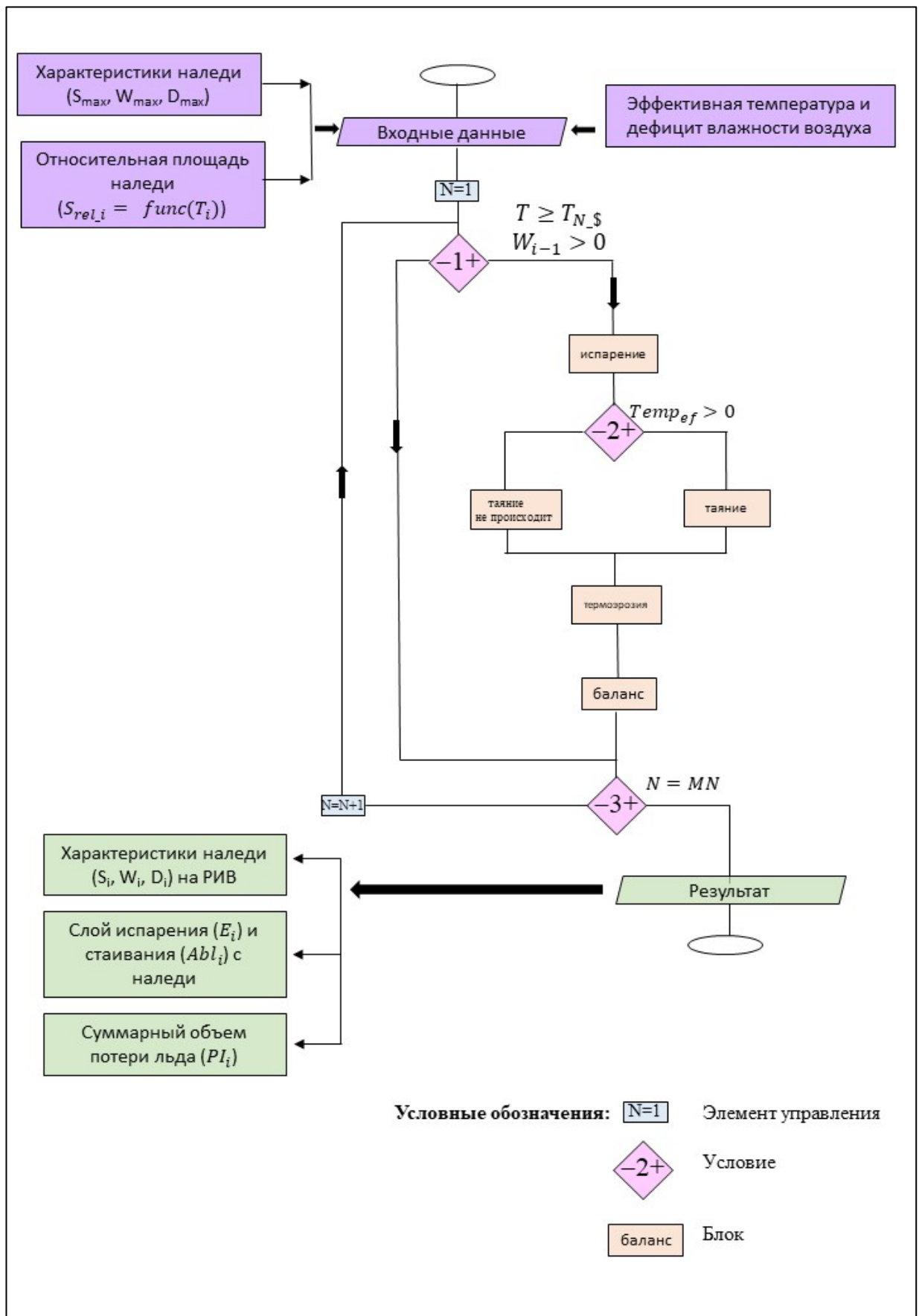


Рис. 4. Схема блока «Наледь»

4) Термомеханическое разрушение наледи – рассчитывается изменение площади и объёма наледи за счет блокового разрушения.

$$S_1 = S_{max} * S_{rel_1}$$

$$S_i = S_{max} * S_{rel_i}$$

$$W_1 = S_1 * D_1$$

$$W_i = S_i * D_i$$

5) Баланс – рассчитывается суммарный объём потери льда в *i*-й РИВ за счет испарения, блокового разрушения и таяния под действием солнечной радиации.

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

На основе исторических данных (1967–1970 гг.) и материалов, полученных в ходе собственных полевых исследований, в том числе с помощью беспилотного летательного аппарата (2021–2022 гг.) проведена апробация, предложенного алгоритма расчета наледного стока. Результаты анализа показали, что отклонение расчётных и натурных данных составило 2–10% и 1–9% для максимальных величин площади и объёма соответственно (Рис. 5).

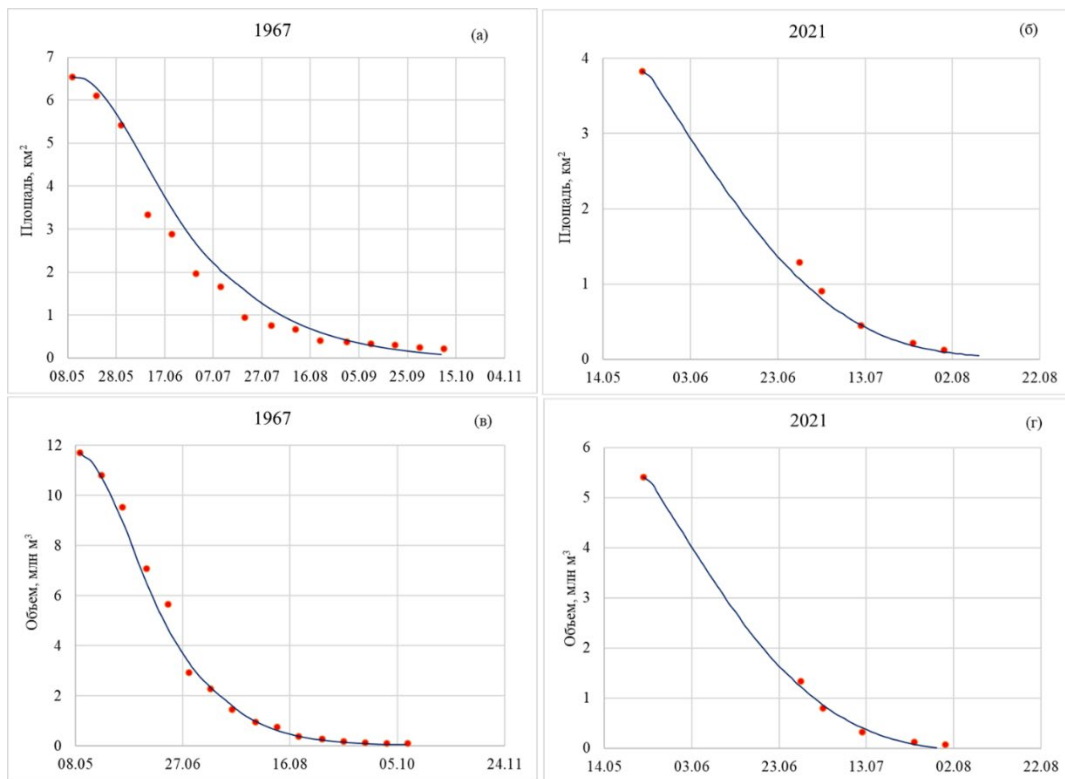


Рис. 5. Внутригодовая динамика характеристик наледи – площади (а, б) и объёма (в, г) по данным наблюдений (красные точки) и результатам расчета (синяя кривая).

Проведено моделирование процессов формирования стока на суточном интервале за периоды наличия данных о максимальной площади и объеме наледи: 1967–1987 гг. и 2000–2022 гг. Результатом являются суточные гидрографы стока воды и значения элементов водного баланса в створе р. Анмангында с учётом наледного стока.

Для оценки результатов моделирования использовались данные гидрологического поста р. Анмангында – Тенькинская трасса, 159-й км о суточных расходах воды сети Росгидромет за период 1967–1987 гг. и отрывочные сведения об измеренных расходах воды в том же створе р. Анмангында, полученные автором в результате полевых работ в 2021–2022 гг. Также проведено сравнение результатов моделирования в бассейне р. Анмангында с данными Н.В. Нестеровой, приведенными в ее диссертации. Примеры рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока отражены на Рис. 6.

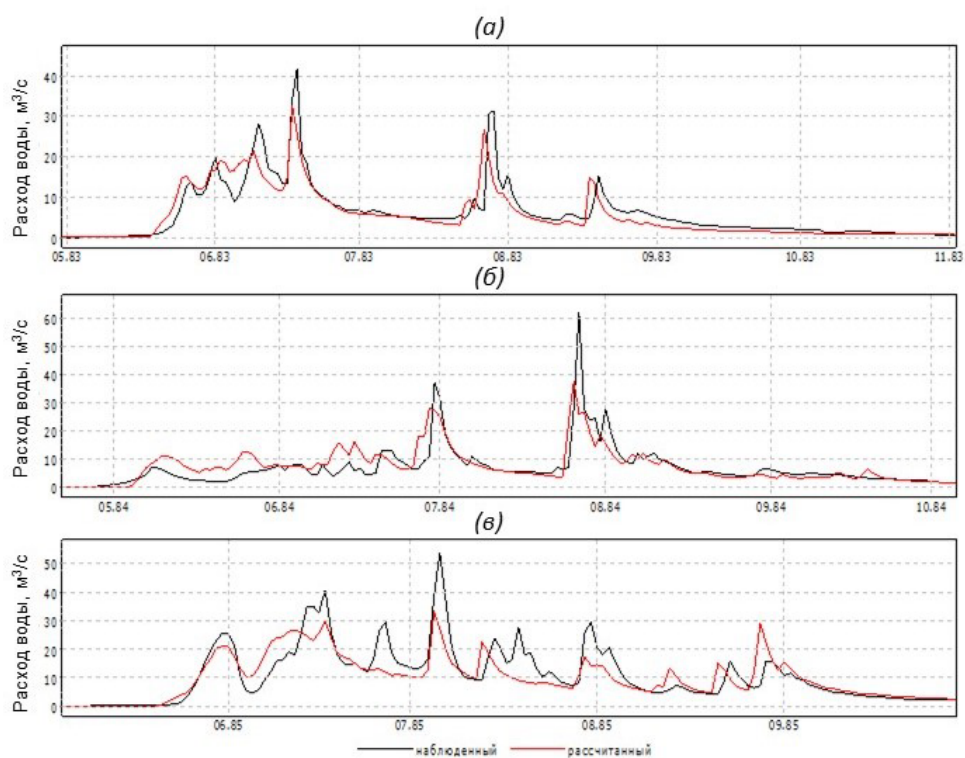


Рис. 6. Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Анмангында, 1983–1985 гг. Критерий Нэша-Сатклиффа составил 0.81, 0.70 и 0.78 соответственно.

В 1967–1987 гг. сумма годовых осадков составила 377 мм, испарение – 113 мм, средний слой рассчитанного стока (включая наледный сток) составил 294 мм, наблюдаемый – 290 мм. Отклонение величин рассчитанного и наблюдаемого стока в среднем составило 36 мм или 13%. Слой наледного стока – 20 мм или 7%. В работе Н.В. Нестеровой наледный сток не учитывался, рассчитанный сток реки за тот же период составил 237 мм, ошибка в

абсолютном и относительном значении – 53 мм или 18%. При использовании обновлённой версии модели критерий Нэша-Сатклиффа составил в среднем 0.57 (медиана 0.62). По сравнению с данными работы Н.В. Нестеровой значения относительной ошибки годовой величины стока уменьшились на 5% (с 18 до 13 %), а средняя величина критерия Нэша-Сатклиффа увеличилась на 0.16 (с 0.41 до 0.57).

В 2000–2022 гг. в среднем слой стока составил 353 мм (по сравнению с 294 мм в 1967–1987 гг.), при этом максимальные и минимальные значения также значительно увеличились по сравнению с предыдущим периодом – до 600 и 251 мм.

В 1967–1987 годах вклад стока Анмангындинской наледи в годовой сток реки составил от 4 до 12%, в период половодья – от 5 до 36%. Максимальная доля наледного стока наблюдалась в 1981 г. (Рис. 7), когда годовой слой стока реки составил всего 185.3 мм.

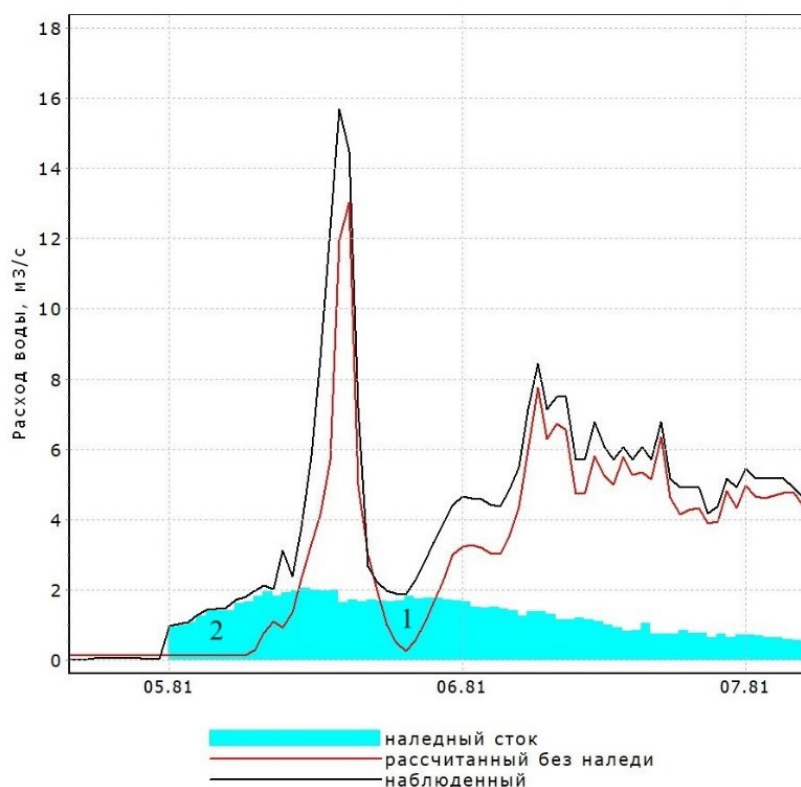


Рис. 7. Рассчитанный общий и наледный сток р. Анмангынды в период половодья, 1981 г.

Области 1 и 2 показывают формирование наледного стока до вскрытия русла и начала формирования речного стока в створе поста и почти 100% долю наледного стока в течение нескольких дней половодья, соответственно.

В современный период 2000–2022 гг. из-за сокращения максимальных размеров наледи, а также изменения гидрологического режима реки Анмангынды, наблюдается уменьшение влияния наледи на сток – от 3 до 9 % в годовом цикле. Максимальный вклад наледи в годовой сток реки отмечался в 2016 г. и составил 9%, общий слой речного стока в

этом году был 251 мм. Таким образом, роль наледей в формировании стока наиболее сильно проявляется в маловодные годы.

В Заключении сформулированы основные выводы исследования:

1. Проведена оценка многолетней изменчивости характеристик ключевого участка Анмангындинская наледь. На основе исторических и собственных наблюдений выявлена тенденция сокращения максимальных размеров на 15% и 17% для площади и объема соответственно, сокращение периода таяния на 34 дня и смещение дат начала ее формирования. Главную роль в формировании максимальных размеров Анмангындинской наледи играют условия предзимнего периода, такие как средняя температура воздуха и сумма осадков за ноябрь-декабрь. При этом в 1963–1990 гг. на характеристики наледи оказывали влияние в большей степени метеорологические условия октября-ноября.

2. На основе космических снимков 2013–2020 гг. разработан актуальный каталог наледей подземных вод Магаданской области. Всего выявлено 2510 наледей общей площадью 1132.3 км², из которых 278 относятся к гигантским, т.е. имеют площадь свыше 1 км². Выявлены расхождения современных данных и данных Кадастра наледей Северо-Востока (1958). Проведен расчет, картирование и анализ закономерностей формирования наледных характеристик. К бассейну р. Колыма относится 1504 наледей с суммарной площадью 744.6 км², к бассейну р. Индигирка – 15, а к бассейнам рек Охотского моря – 991 наледь.

3. Разработаны карты наледности Магаданской области, проведена оценка вклада наледного стока в сток рек частных водосборов р. Колыма и бассейнов рек Охотского моря в различные фазы гидрологического режима. В годовом стоке рек наледный сток составляет от 1.4 до 20.7 мм или 0.4 и 14%. В период весеннего половодья доля наледного стока в среднем составляет 2.8%, а в зимний период – 33% речного стока изымается на формирование наледей. На примере бассейна р. Анмангында доля наледного стока составляет 14% в годовом стоке реки и до 30% в период весеннего половодья.

4. Для распределенной гидрологической модели «Гидрограф» разработан блок «Наледь» для моделирования процессов формирования стока рек с наледным питанием на суточном интервале. Он позволил улучшить результаты расчета в среднем на 5%.

5. Предложенный алгоритм блока «Наледь» позволяет уточнять составляющие водного баланса и их распределение в разные сезоны года в бассейнах рек криолитозоны, а при решении практических задач – проводить более обоснованные расчеты гидрологических характеристик, в том числе при формировании опасных гидрологических явлений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография:

1. 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

В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science или Scopus:

2. **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>

3. Макарьева О.М., Шихов А.Н., **Землянскова А.А.**, Алексеев В.Р., Нестерова Н.В., Осташов А.А. Гигантские наледи-тарыны северо-востока России по данным кадастра (1958 г.) и космическим снимкам 1973–2021 гг. // *Криосфера Земли*. – 2023. – Т. XXVII. – № 6. – С. 27–39. DOI: 10.15372/KZ20230603

4. **Землянскова 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>

5. Alekseev V.R., Makarieva O.M., Shikhov A.N., Nesterova N.V., **Zemlyanskova A.A.**, Ostashov A.A. Giant Taryn Aufeis in the Northeast of Russia. *Geography and Natural Resources*. – 2023. – Vol. 44. – P. 253–259. <https://doi.org/10.1134/S1875372823030010>

6. Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A., **Zemlyanskova A.**, Luo D., Ostashov A., Alexeev V. Giant aufeis – unknown glaciation in North-Eastern Eurasia according to Landsat images 2013-2019 // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14. – P. 4248.

7. Makarieva O., Nesterova N., Haghghi A.T., Ostashov A., **Zemlyanskova A.** Challenges of Hydrological Engineering Design in Degrading Permafrost Environment of Russia // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 2649. <https://doi.org/10.3390/en15072649>

8. 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

9. Макарьева О.М., Алексеев В.Р., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Осташов А.А., **Землянскова А.А.**, Семакина А.В. Картографирование гигантских наледей северо-востока России // *Криосфера Земли*. – 2022. – Т. XXVI. – № 4. – С. 47–58. DOI: 10.15372/KZ20220404

10. 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 Saint Petersburg University. Earth Sciences. – 2021. – Vol. 66(1). – P. 74–90. DOI: 10.21638/SPBU07.2021.105.

В российских журналах, включенных в текущий перечень ВАК:

11. Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Нестерова Н.В., **Землянскова А.А.**, Шихов А.Н., Осташов А.А. Наледи-тарыны Северо-Востока России по историческим данным // Арктика и Антарктика. – 2021. – № 4. – С. 75–118. DOI: 10.7256/2453- 8922.2021.4.36590

12. **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. С.1-20. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.69780

Свидетельства о государственной регистрации баз данных:

13. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620267. Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для Чукотского полуострова: опубл. 12.02.2021 / О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Осташов, Н.В. Нестерова, **А.А. Землянскова**, А.В. Семакина, В.Р. Алексеев; заявитель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620317. Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Индигирка: опубл. 24.02.2021 / О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Осташов, Н.В. Нестерова, **А.А. Землянскова**, В.Р. Алексеев; заявитель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

15. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620332. Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Колыма: опубл. 26.02.2021 / О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Осташов, Н.В. Нестерова, **А.А. Землянскова**, В.Р. Алексеев; заявитель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

16. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620333. Наледи Северо-Востока России: ГИС каталог для бассейна реки Яна: опубл. 26.02.2021 / О.М. Макарьева, А.Н. Шихов, А.А. Осташов, Н.В. Нестерова, **А.А. Землянскова**, В.Р. Алексеев; заявитель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.