

УДК 551.89:551.345

Оценка мощности мерзлых толщ острова Новая Сибирь по данным геотермии и численного моделирования*

А. В. Гаврилов¹, В. В. Малахова², Е. И. Пижанкова¹, А. А. Попова³

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

³ ООО «Северные Изыскания»,
Российская Федерация, 108811, Москва, Киевское шоссе, 4

Для цитирования: Гаврилов, А. В., Малахова, В. В., Пижанкова, Е. И., Попова, А. А. (2023). Оценка мощности мерзлых толщ острова Новая Сибирь по данным геотермии и численного моделирования. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 68 (4), 622–645. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.401>

Существующие представления о мощности мерзлых пород на о. Новая Сибирь весьма неоднозначны, как в отношении формирующих ее факторов, так и по величине (от 240 до 600 м и более), и в целом основываются на предположении о плиоценовом начале промерзания пород. В последние 20 лет получены новые данные по истории развития региона в неоплейстоцене. Они включают информацию о продолжительном существовании о. Новая Сибирь в морских условиях, что исключает промерзание пород в этот период, а также о развитии оледенения в среднем неоплейстоцене. Указанные данные свидетельствуют о существенно более позднем начале промерзания острова, которое коррелирует с нестационарностью температурного поля мерзлых толщ. Подлинность данных дискутируется. Статья посвящена оценке мощности мерзлоты в соответствии с тремя возможными сценариями, позволяющими учесть разные точки зрения на геологическое развитие региона. Оценка производится с помощью численного моделирования формирования мерзлых толщ в течение последних 200 тыс. лет. Один сценарий включает существование оледенения в среднем неоплейстоцене, в двух

* Работа выполнена в рамках государственного задания Лаборатории охраны геологической среды геологического факультета МГУ (проект № 16555398) (в части построения палеогеографического сценария) и рамках проекта НИОКТР № 123081400010-2 (доп. соглашение с Минобрнауки РФ № 075-03-2023-506/1) (в части численного моделирования и верификации сценария).

других — оно отсутствует. Различаются последние два сценария используемыми стратиграфическими схемами. Достоверность сценариев оценивается на основании итогов сопоставления результатов моделирования по каждому из них с данными геотермии в скважине на о. Новая Сибирь, полученными в 1970-х годах. Результаты сопоставления показывают, что только вариант с существованием ледника соответствует геотермическим данным. В соответствии с полученными данными промерзание острова началось под ледником, существовавшим в прибрежно-морских условиях, в конце среднего неоплейстоцена. А наиболее активно оно происходило в криохроны позднего неоплейстоцена в связи с осушением острова. Полученный результат соответствует новым данным о возрасте основных геологических тел региона, а также представлению о гляциотектонической природе дислокаций в породах верхнего мела — среднего неоплейстоцена.

Ключевые слова: Новосибирские острова, сценарий геологического развития, оледенение, гляциоизостатические движения, многолетнемерзлые породы, палеотемпературный сценарий, численное моделирование.

1. Введение

1.1. Проблемы региональной геокриологии

На рубеже XX–XXI вв. в региональной геокриологии и четвертичной геологии восточно-сибирского сектора Арктики обозначились проблемы.

В сводках по региональной геокриологии России (Геокриология СССР..., 1989; Геокриологическая карта..., 1996) и мира (Ершов, 1998) характеристика мощности криолитозоны и яруса многолетнемерзлых пород (ММП) на островах Северного Ледовитого океана осуществлена на основе общих экспертных оценок. Указанное всецело относится к оценке мощности ММП о. Новая Сибирь (острова Анжу архипелага Новосибирские острова). Обоснованные сведения о мощности, включая верификацию данных о шельфовой мерзлоте, выполненную с помощью расчетных или геофизических методов, имеют большое значение для исследования региональной геокриологии. Подобные сведения требуются и в планировании экономико-социального развития Арктики. Прилегающий шельф оценивается как перспективный в плане добычи углеводородного сырья. Важнейшее значение имеет также создание инфраструктуры Северного морского пути, роль которого в экономике Арктики и обеспечении национальной безопасности России продолжает возрастать.

Геотермические данные по Новосибирским островам получены в 1970-х годах в ходе геологической съемки масштаба 1:200 000. В опубликованном виде они содержатся в ряде работ (Соловьев, 1981; Зайцев и др., 1989; Зайцев, 1998). Эти данные позволили описать температурный режим и водно-физические свойства пород верхней 100–200-метровой части разреза к северу от континента — на островах Анжу и Ляховских архипелага Новосибирские острова (73–76° с. ш.). Их характеристику и опубликованные результаты оценки мощности ММП можно представить следующим образом.

1. Подошва ММП бурением до глубины 215 м (скважина «с-А» на о. Новая Сибирь, рис. 1) не вскрыта. Мощность ММП и криолитозоны в целом, по электроразведочным данным (Соловьев, 1981), не превышают 400–500 м. Такими значениями

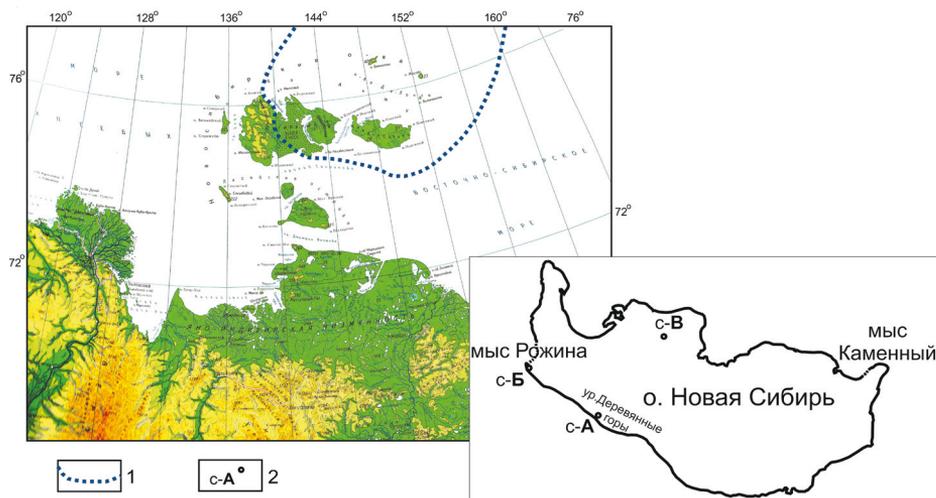


Рис. 1. Район исследований:

- 1 — Граница среднеплейстоценового оледенения (Басилян и др., 2009);
 2 — скважины на о. Новая Сибирь, где проводилась термометрия (Государственная..., 1998; Геологическая карта..., 1981)

характеризуются результаты интерпретации профиля вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). Он пройден от о. Котельный через север Земли Бунге до Стрелки Анжу на о-ве Фаддеевский¹.

2. Температура пород на подошве слоя ее годовых колебаний характеризуется значениями от -11 до -15 °С. Разрезу островов Новая Сибирь и Ляховские в диапазоне глубин от 20 до 200 м свойственны большие величины геотермического градиента. Независимо от геологического строения и рельефа они достигают $5-6$ °С/100 м (Соловьев, 1981; Зайцев и др., 1989). Эти величины дали основание В. А. Соловьеву предположить высокую плотность теплового потока, идущего из недр, для региона в целом.

3. В качестве ориентира для мощности ММП при ее оценке В. А. Соловьевым были приняты данные ВЭЗ. А сама оценка осуществлена на основании геотермических градиентов. Их высокие значения этим исследователем использованы для получения нижнего предела мощности ММП, а значения $2-3$ °С/100 м — для определения ее верхнего предела.

Полученные мощности (от 275–300 до 450–600 м) (Зайцев и др., 1989) использованы при составлении региональных сводок по криолитозоне России (Геокриологическая карта..., 1996) и мира (Ершов, 1998). В первой из них Новосибирские острова характеризуются меньшей (300–500 м) мощностью ММП, нежели расположенные южнее приморские низменности (500–700 м). Во второй, наоборот, подчеркивается широтная зональность в распределении мощности при ее максимуме на побережье континента и островах — 500 м и более. При этом авторы сводок ис-

¹ Здесь используется прежнее, исторически сложившееся название «о. Фаддеевский», фигурирующее на топографических картах 1980-х годов. В настоящее время на общегеографических картах он назван полуостровом о. Котельный.

ходят из существования стационарного температурного поля в толще пород (промерзание с плиоцена), которое таковым является лишь на континенте. На о. Новая Сибирь, по данным В. А. Соловьева, оно носит нестационарный характер.

В течение 2000-х годов получены новые данные по истории геологического развития островов Новая Сибирь и Фаддеевский в среднем неоплейстоцене — голоцене. Они позволяют увязать высокие геотермические градиенты с историей развития региона и более определенно оценить мощность ММП. Для оценки привлекаются как данные геотермических наблюдений в скважине «с-А», так и численное моделирование. В связи с дискуссией вокруг возможности существования оледенений в Восточной Арктике и возрасте отложений нерпичинской и канарчакской свит моделирование осуществлялось при трех сценариях геологического развития региона. Реалистичность каждого сценария выявляется по степени соответствия результатов моделирования геотермическим данным, полученным по скважине «с-А» (рис. 1). Одновременно указанная степень соответствия дает возможность судить об обоснованности каждой из конкурирующих схем геологического развития региона.

В геолого-структурном отношении о. Новая Сибирь относится к эпипоздне-киммерийской платформе. Она охватывает шельф морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и приморские низменности на континенте (Государственная..., 1999; Басилян и Никольский, 2007). Чехол платформы представлен мезокайнозойскими образованиями. Это отложения бунгинской и деревянногорской свит верхнего мела, анжуйской свиты эоцена, нерпичинской и канарчакской свит неоплейстоцена и голоцена. Их суммарная мощность достигает 400 м. На выступе фундамента (на севере острова), представленного терригенными юрскими породами, мощность чехла сокращается до 60 м.

1.2. Проблемы четвертичной геологии

В связи с появлением новых данных в геологии среднего неоплейстоцена — голоцена возникли проблемы и в области четвертичной геологии. К ним можно отнести возраст нерпичинской и канарчакской свит, слагающих береговые обнажения о. Новая Сибирь; существование оледенения, охватывавшего острова де Лонга, Новая Сибирь, Фаддеевский и прилегающий шельф; возраст и причины складчатых деформаций отложений острова. Все три вопроса кайнозойской истории относятся к проблемным. Дискуссия по ним представляется актуальной в связи с составлением в настоящее время Государственной геологической карты третьего поколения на площадь листа S-55, 56.

Возможность оледенения в восточном секторе Арктики из-за криоаридности обстановок в криохроны отрицается уже не менее полувека. Обострение дискуссии в последнее время связано с получением данных о хлоридно-натриевом составе пластового льда о. Новая Сибирь (Иванова, 2012). Комплекс новых данных по четвертичной истории островов Новая Сибирь, Фаддеевский и окружающего шельфа можно описать следующим образом.

1. На указанных островах изучены пластовые льды. Показано, что это остатки неоплейстоценового ледника (Анисимов и др., 2006; Басилян и Никольский, 2007; Тумской, 2012; Тумской, 2023), центр которого предположительно находился на

островах Де Лонга. Отложения ледникового осадочного комплекса зафиксированы картой четвертичных образований России масштаба 1 : 2 500 000 (Карта четвертичных..., 2013).

2. В строении четвертичных отложений островов Новая Сибирь и Фаддеевский выделяются два структурных этажа: толща, смятая в складки, и недислоцированные отложения, залегающие выше. На контакте этих комплексов наблюдается несогласие. Оно прослеживается на севере островов Новая Сибирь и Фаддеевский и является надежным региональным стратиграфическим репером (Басилян и Никольский, 2007; Голионко и др., 2019).

Интенсивные дислокации нижнего этажа связаны с деятельностью ледника, т. е. это — гляциодислокации. Весь же комплекс дислоцированных мезокайнозойских отложений, включая пластовый лед и ледогрунты, по сути, является основной чешуйчатой мореной. На ней залегает абляционная морена, а еще выше — недислоцированная верхне-канарчакская толща позднего неоплейстоцена. Для дислоцированной толщи характерны совместные (согласованные) деформации осадочных пород, пластовых льдов и ледогрунтов.

3. Возраст отложений разреза островов Новая Сибирь и Фаддеевский обоснован использованием комплекса биостратиграфических методов и радиологического датирования (Басилян и др., 2010; Басилян и Никольский, 2007; Голионко и др., 2019). Дислоцированные и недислоцированные морские отложения в целом по фауне моллюсков сопоставляются с неоплейстоценом. Полученные в настоящее время U/Th датировки по раковинам моллюсков позволяют сопоставить нерпичинскую свиту и трансгрессивную (нижнюю) часть канарчакской свиты со средним неоплейстоценом, а регрессивную (верхнюю) часть канарчакской свиты с нижней частью позднего неоплейстоцена.

4. В связи с существованием ледника в перигляциальной зоне (о. Б. Ляховский, южный берег пролива Дм. Лаптева) во время, соответствующее МИС-6 (морская изотопная стадия), формировались флювиогляциальные отложения. К ним относятся малольдистые алевроиты и пылеватые пески куччугуйской свиты, нетипичные для криохронов Восточно-Сибирской Арктики (Тумской, 2012; Тумской, 2023).

2. Методы оценки мощности мерзлых толщ

Исследования проводятся путем анализа фактических данных и численного моделирования. Последнее предполагает осуществление следующих этапов работы:

- 1) задание начальных температурных условий;
- 2) построение концептуальных моделей (сценариев) истории геологического развития региона в виде моделей эволюции температуры пород;
- 3) составление геологической модели, характеризующей условия теплопередачи в массиве пород, и плотность теплового потока из недр (или геотермический градиент);
- 4) численное моделирование формирования температуры и мощности мерзлых пород;
- 5) оценка достоверности полученных модельных данных.

2.1. Описание численной модели

Для расчета теплового состояния ММП используется одномерная модель теплофизических процессов в их толще с учетом фазовых переходов между мерзлыми и тальми отложениями (Malakhova and Eliseev, 2020; Gavrilov et al., 2020).

Распространение тепла в отложениях описывается посредством решения одномерного уравнения теплопроводности:

$$C_i \partial T / \partial t = (\partial / \partial z) (\lambda_i \partial T / \partial z). \quad (1)$$

На границе между мерзлыми и тальми породами (Z_f) допускается условие равенства температуры пород температуре замерзания воды T_f и условие Стефана для подвижной границы фазовых переходов, при $z = Z_f$

$$\lambda_{th} (\partial T / \partial z)_{th} - \lambda_f (\partial T / \partial z)_f = LW\rho_D \partial Z_f / \partial t. \quad (2)$$

На верхней границе расчетной области при $z = 0$

$$T = T_B. \quad (3)$$

На нижней границе расчетной области ($H_S = 1500$ м) задается геотермический поток G , при $z = H_S$

$$\lambda_{th} \partial T / \partial z = G. \quad (4)$$

Используемые обозначения: T — температура отложений; t — время; z — глубина от земной поверхности; C_i — объемная теплоемкость отложений; λ_i — коэффициент теплопроводности отложений (нижний индекс i принимает одно из значений: f — мерзлые или th — тальные отложения); W — относительное влагосодержание пород; L — удельная теплота замерзания и таяния воды в порах отложений ($L = 3.35 \cdot 10^5$ Дж/кг); ρ_D — плотность скелета; T_B — температура на поверхности отложений; G — геотермический поток.

Физические и теплофизические свойства пород, используемые при численном моделировании, зависят от глубины залегания и состава пород и задавались в соответствии с принятой геологической моделью. Мы предполагаем, что поры пород полностью заняты водой или льдом.

Граничное условие на поверхности отложений (3) определяется периодами трансгрессий/регрессий с учетом изменения уровня моря, существования или отсутствия ледниковых условий за последние 200 тыс. лет.

Численная реализация модели (1) — (4) основана на методе прогонки на дискретной вычислительной сетке с вертикальным шагом 0.5 м и неявной схеме по времени с шагом 1 месяц.

2.2. Метод составления палеотемпературного сценария

Для региона, включающего Новосибирские острова и прилегающие низменности севера Якутии, нет палеотемпературных данных, необходимых для построения сценария. Поэтому при его создании использовались изотопные палеотемпературные кривые, полученные по ледниковым кернам Восточной Антарктиды, отражающие ход глобальных колебаний климата. Они трансформировались с по-

мощью палеотемпературных реконструкций, имеющих для отдельных временных отрезков на указанных островах и приморских низменностях севера Якутии, развивавшихся в позднем кайнозое как единый регион. Дискретные региональные температурные данные использовались как региональные палеотемпературные реперы. Такой подход позволил преобразовать изотопную антарктическую палеотемпературную кривую в непрерывную во времени региональную кривую эволюции температуры пород (Гаврилов, 2008). В роли реперов выступили реконструкции, составленные на основе данных о ширине элементарных жилков в повторно-жильных льдах (ПЖЛ) (Каплина и Кузнецова, 1975), построенные по распределению основных породообразующих минералов по гранулометрическому спектру (Конищев, 1999), сведения о криометаморфизации подземных вод в процессе промерзания (Фотиев, 1997). Принимались во внимание также реконструкции, созданные по данным изотопного состава повторно-жильных льдов (Деревягин и др., 2010) и комплексу палеоэкологических данных (Andreev et al., 2004; Wetterich et al., 2016).

3. Сценарии истории геологического развития региона

Сценарий «А» составлен в соответствии с хроностратиграфией (Тумской и Базилян, 2006; Базилян и др., 2010; Wetterich et al., 2016) и с существованием покровного оледенения (Анисимов и др., 2006; Базилян и др., 2010; Тумской, 2023). В сценарии «Б» используется та же стратиграфическая схема, но без существования ледника. Сценарий «В» составлен в соответствии со стратиграфической схемой (Геологическая карта..., 1981; Государственная..., 1999), где оледенение в перечне геологических событий среднего неоплейстоцена также не значится.

3.1. Составление сценария истории геологического развития региона в течение последних 200 тыс. лет в соответствии с новыми данными

При создании сценария «А» возникла необходимость составления моделей эволюции уровня моря и температуры пород, а также модели гляциоизостатических движений земной поверхности (ложе ледника). Геологическая модель включает в себя задание порядка напластования пород, их водно-физических, теплофизических свойств и плотности геотермического потока из недр.

3.1.1. Начальные температурные условия

С конца раннего до начала позднего неоплейстоцена район островов Новая Сибирь и Фаддеевский представлял собой морской залив (Государственная..., 1999). Здесь в условиях более теплого и мягкого климата по сравнению с современным (Базилян и Никольский, 2007; Голионко и др., 2019) осуществлялось накопление осадков нерпичинской и канарчакской свит. В соответствии с данными о составе комплекса моллюсков из отложений свит, залив был опреснен, а глубины не превышали 20–50 м (Базилян и Никольский, 2007; Голионко и др., 2019; Государственная..., 1999). Температура воды — около 200 тыс. лет назад (начальные температурные условия), — согласно вышеуказанным данным, принята в сценарии равной -1.0°C .

3.1.2. Оледенение и модель гляциоизостатических движений земной коры

Известно, что динамика земной поверхности и недр районов оледенений определяется воздействием ледниковой нагрузки, последующей разгрузки и обусловленным ими перемещением вещества земной коры и верхней мантии (астеносферы) (Ушаков и Красс, 1972). Погружение поверхности под ледником сопровождается вытеснением подкорового вещества под его тяжестью. При дегляциации происходит обратный процесс: земная поверхность (ледниковое ложе) поднимается как минимум на такую же величину.

Указанный процесс в выполненных исследованиях отражен в виде гляциоизостатической модели (рис. 2). Для ее составления использовались непосредственные данные или реконструкции абсолютных отметок земной поверхности (ледникового ложа) в трех точках на шкале времени. Первая временная точка — это период оледенения, вторая — современность и третья — период осушения.

Обратимся к первой временной точке. Реконструируются абсолютные отметки ледникового ложа в период оледенения МИС-6. Для этого используются сведения о падении уровня моря в пессимум МИС-2 и фаунистические данные ниже-канарчакских отложений, позволяющие оценить глубину моря. Принимается, что в МИС-6 арктический шельф осушался, так же как и в МИС-2 (Vauch et al., 2001). По сейсмоакустическим данным, регистрирующим развитие мерзлых отложений в верхней части континентального склона (Романовский и др., 1997), осушение достигало отметок минус 120 м. Поэтому указанные значения приняты в качестве вы-



Рис. 2. Модель гляциоизостатических движений земной коры в районе о. Новая Сибирь в последние 200 тыс. лет:

- 1 — кривая колебаний Восточно-Сибирского моря вне области оледенения;
- 2, 3 — модель изменения абсолютных высот поверхности на юге (2) и севере (3) острова;
- 4 — фактические данные о колебаниях уровня моря вне области оледенения;
- 5 — современный уровень моря

сотного положения береговой линии во время МИС-6. Сведения о видовом составе ниже-канарчакской фауны морских моллюсков показывают, что море могло достигать глубин около 50 м (Государственная..., 1999). В сумме указанные сведения дали возможность оценить абсолютные отметки ледникового ложа как составляющие минус 170 м.

Вторая временная точка — современность. Современные абсолютные отметки ледникового ложа МИС-6 — это абсолютные отметки контакта совместно дислоцированных комплексов верхнего мела — среднего неоплейстоцена с недислоцированными верхне-канарчакскими отложениями или абсолютные отметки подошвы последних. На севере острова, представляющем гляциоизостатически поднятую послеледниковую равнину, они составляют 30–40 м. Южная часть острова, кроме района поднятия Деревянные горы, по преимуществу перекрыта отложениями ледового комплекса (ЛК) (Тумской, 2012; Базилян и Никольский, 2007). В береговых обрывах, склонах долин рек и оврагов в основном обнажаются только верхне-канарчакские отложения. Лед вскрывается лишь в скважинах Благовещенского пролива в 1 км от берега, на мысе Рожина, а также к юго-востоку от мыса Утес Деревянных гор. В первой из этих скважин он представлен пластами мощностью 3 и 1 м на глубине 41 и 47 м (Соловьев и др., 1987). В соответствии с геологическим строением на севере острова современное высотное положение палеоложа задается в районе отметок 30 м (см. рис. 2, кривая 3), на юге — предположительно в диапазоне от 0 до минус 20 м (см. рис. 2, кривая 2).

Третья временная точка — период осушения — задается как период расселения на острове мамонтовой фауны. Выше указана его дата — не позднее 54 тыс. лет назад. Она относится к концу пессимума МИС-4. Начало расселения целесообразно относить к середине или даже началу МИС-4 (календарное время около 65 или 70 тыс. лет назад соответственно). По очертаниям кривых 1–3 (рис. 2) можно понять, что осушение должно было происходить усиленными темпами. Гляциоэвстатическое по своей природе, оно осуществлялось на фоне неуклонного гляциоизостатического подъема земной поверхности (ледникового ложа). Абсолютные высоты поверхности в период осушения реконструируются исходя из кривой 1 (рис. 2). На юге острова они задаются равными минус 80 м, а время осушения — около 70 тыс. лет назад. Реконструкция осушения севера острова рассматривается ниже.

3.1.3. Палеотемпературная модель

Палеотемпературная модель позволяет задать верхние граничные условия при моделировании (рис. 3). В истории развития региона (сценарий «А», рис. 3, а) выделяются четыре этапа: доледниковый (рубеж раннего и среднего неоплейстоцена — около 190 тыс. лет назад), ледниковый (190–130 тыс. лет назад), этап дегляциации (от 130 до 70–55 тыс. лет назад) и этап континентального развития и многолетнего промерзания пород (от 70–55 тыс. лет назад до современности).

Первый этап описан выше. Оледенение в течение второго этапа происходило на фоне двух процессов: глобального падения уровня морей в МИС-6 (см. рис. 2, кривая 1) и погружения ледникового ложа под действием ледниковой нагрузки. Погружение было действеннее (рис. 2, кривая 2), о чем свидетельствует накопление трансгрессивной толщи канарчакской свиты в МИС-6 (Базилян и Никольский, 2007).

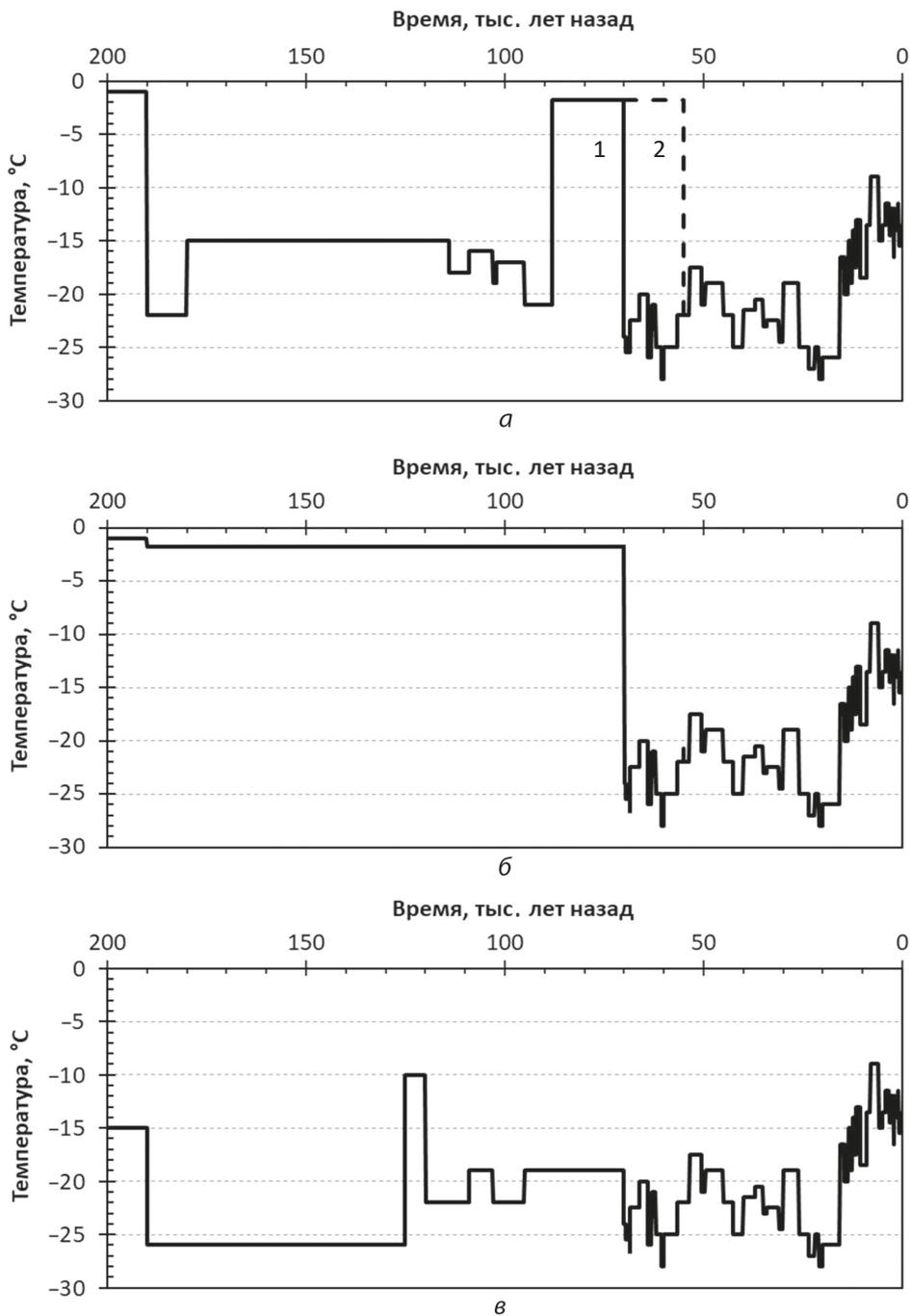


Рис. 3. Модель эволюции температуры пород острова Новая Сибирь:

а — с существованием оледенения: 1 — для южной части острова; 2 — для северной области (отражена часть модели, отличающаяся от южной); б — без оледенения, в соответствии с хроностратиграфической схемой (Тумской и Басилян, 2006; Басилян и др., 2010); в — без оледенения в соответствии со стратиграфической схемой (Государственная..., 1999)

Поэтому сценарием задано, что оледенению сопутствовали прибрежно-морские и морские условия. Ледник производил экзарационно-аккумулятивную деятельность. Будучи примерзшим к дну, он возвышался над уровнем моря, являясь проводником атмосферного холода в толщу пород. Для оценки температуры пород под ледником использовалось значение геотермического градиента ($2^{\circ}\text{C}/100$), полученного по геотермическим наблюдениям в наиболее представительной скважине в пос. Тикси (Девяткин, 1993). Отопляющее влияние ледника равнялось 12°C . Температура субгляциальных пород составляла -15°C .

Третий этап на юге о. Новая Сибирь — процесс дегляциации — растянулся на всю стадию МИС-5 (130–70 тыс. лет назад). В его раннюю фазу (130–88 тыс. лет назад) ледник возвышался над уровнем моря. Для позднего периода (88–70 тыс. лет назад) принято считать, что остатки ледника, как и прежде, примерзшего к дну, в основном находились под водой. Охлаждающее влияние ледника в раннюю фазу ощущалось в радиусе сотен километров от него. В результате во время теплого межледниковья — МИС-5е — на Ляховских островах и континентальном побережье формировался выделенный В.Е. Тумским (Тумской, 2012; Тумской, 2023) быччыгыйский ледовый комплекс. Зимы по данным изотопного состава повторно-жильных льдов (ПЖЛ) были столь же холодными, как в криохроны МИС-4 и МИС-2 (Wetterich et al., 2016; Opel et al., 2017). Быччыгыйский ЛК формировался в течение МИС-5е-б. Температура пород в модели в это время задавалась понижающейся по мере сокращения мощности ледника и изменявшейся на этом фоне в соответствии с колебаниями температуры воздуха: от -15 до -21°C (рис. 3).

Поздняя фаза дегляциации соответствовала потеплению МИС-5а, которое, как и потепление МИС-5с, реконструируется по двум торфяным линзам в толще быччыгыйского ЛК. Они связаны с развитием озерного термокарста по быччыгыйским ПЖЛ. Даты торфяников IRSL 99 ± 19 и 102 ± 16 тыс. лет назад (Andreev et al., 2004) и Th/U 98 ± 5 тыс. лет назад относятся к МИС-5с, а дата Th/U 89 ± 5 тыс. лет назад (Wetterich et al., 2016) — к МИС-5а. Температура июля во время потепления была на $4-5^{\circ}\text{C}$ выше современной (Деревягин и др., 2010). В условиях холодных быччыгыйских зим температура донных отложений постепенно мелеющего моря принята равной -1.8°C .

Северная часть о. Новая Сибирь в отношении распространения, мощности пластовых льдов и абсолютных высот их кровли существенно отличается от южной. Известно, что центрально-ледниковые области наиболее изученных Лаврентийского и Скандинавского плейстоценовых ледниковых щитов продолжают изостатически подниматься, тогда как периферийные давно остановились в поднятии или начали опускаться. Подобная аналогия усматривается и в отношении северной и южной, явно периферийной, частей рассматриваемого Новосибирского ледника. Поэтому в предположении о незавершенности поднятия севера острова в его пределах задана более поздняя смена морских условий континентальными. На севере о. Новая Сибирь у обнажения «Вершина» зафиксирован торфяник, свидетельствующий о развитии озерного термокарста по ЛК позднего неоплейстоцена. Он мог формироваться исключительно в континентальной обстановке. Наличие запредельной C^{14} датировки в наиболее древнем горизонте торфяника (от > 28 до 18.9 тыс. лет назад) (Павлова и др., 2010) показывает необходимость учета также более ранних потеплений в МИС-3. Свидетельства таковых зарегистрированы

лишь на континенте: в дельте р. Лены (около 44 тыс. лет назад (Schirrmeister et al., 2003)), в низовьях р. Колымы (от 37 до 43.7 тыс. лет назад (Каплина, 1987)). Исходя из перечисленного, время осушения было задано около 55 тыс. лет назад. Оно предусматривает также наличие времени для накопления ЛК.

Четвертый этап является этапом континентального развития о. Новая Сибирь (70–55 тыс. лет назад — современность). Это период интенсивного многолетнего промерзания пород. Его началом явилась смена накопления регрессивной толщи канарчакской свиты накоплением ЛК позднего неоплейстоцена. Для задания среднегодовой температуры пород в криохроны в качестве одних из ключевых принимались реконструкции, полученные на основе геокриологических методов (Конищев, 1999; Каплина, 1987). Их использование дает понижение температуры пород в пессимумы позднего неоплейстоцена на уровне 10–15 °С по сравнению с современными. Принципиально они хорошо соотносятся с температурами формирования ионно-солевого состава криопэггов, рассчитанными для морских террас низовий Колымы (от –22 до –25 °С) (Фотиев, 1997). Указанные данные качественно соотносятся с данными по изотопному составу ПЖЛ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}}$): наиболее легкие значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}}$ среди фоновых для криохронов соответствуют ЛК МИС-2, МИС-4 и отложениям куччугуйской свиты (Opel et al., 2017).

Послеледниковая и голоценовая части модели строились на основе анализа многочисленных данных по динамике растительности (Andreev et al., 2004), насекомых, по развитию озерного термокарста (Шер, 1997); данных $\delta^{18}\text{O}_{\text{ПЖЛ}}$ (Деревягин и др., 2010); по послеледниковой истории палеосреды акватории с учетом послеледниковых изменений изотопного состава Гренландского ледника (Dansgaard et al., 1993).

3.2. Сценарии с отсутствием ледника

Сценарий «Б» отличается от сценария «А» только отсутствием ледника. Большую часть расчетного времени 200–70 тыс. лет назад прибрежно-морские условия практически исключали промерзание пород. О начале промерзания на рубеже МИС-5а и МИС-4 свидетельствует наличие регрессивной пачки недислоцированных верхне-канарчакских отложений. Период многолетнего промерзания в субаэральных условиях насчитывает 70 тыс. лет.

Вариантом сценария «В» задаются внеледниковые условия и соответствие стратиграфической схеме (Геологическая карта..., 1981; Государственная..., 1999), где отложения канарчакской и нерпичинской свит, слагающие разрез берегового уступа о. Новая Сибирь, относились к плиоцену — эоплейстоцену и верхнему олигоцену — нижнему миоцену соответственно.

В течение расчетного периода поднятие Деревянных гор характеризуется существованием континентальных условий. Морские условия получали развитие только на севере острова. Это имело место в течение МИС-6 (III морская терраса в результате трансгрессии Анжу-I) (Геологическая карта..., 1981; Государственная..., 1999) в пределах выделяемой в варианте «А» послеледниковой морской террасы. В МИС-5е формировались фрагменты II морской террасы на севере и западе острова.

4. Геологическая модель

Геологическая модель строилась на основании данных о геологическом строении островов Новая Сибирь и Фаддеевский (Геологическая карта..., 1981; Государственная..., 1999; Басилян и др., 2010; Анисимов и др., 2006; Басилян и Никольский, 2007; Тумской, 2012; Голионко и др., 2019) и результатов геотермических наблюдений в скважине «с-А». Они проведены до глубины 200 м (рис. 4) (Зайцев

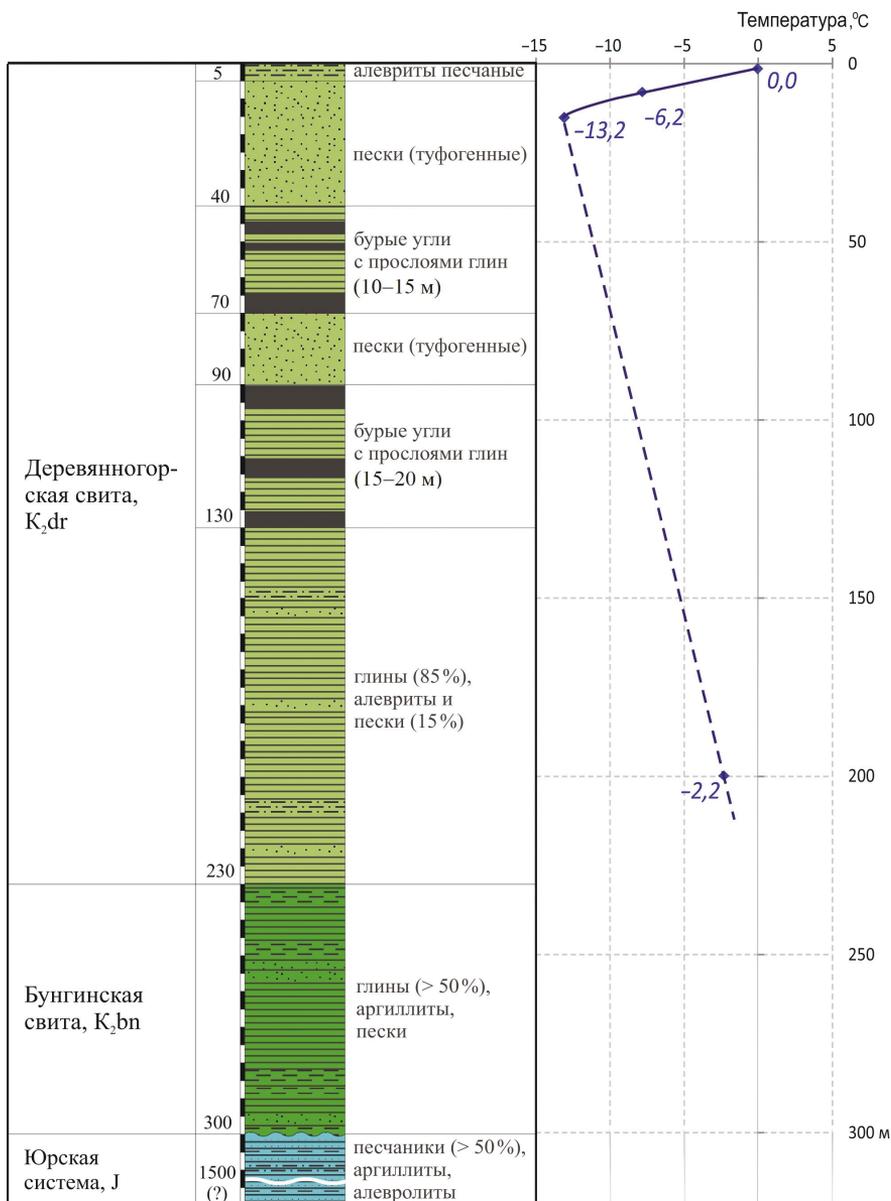


Рис. 4. Геологический разрез по скважине «с-А» и материалам (Государственная..., 1998; Государственная..., 1999) с данными термометрии

и др., 1989). Это район неотектонических поднятий в юго-западной части о. Новая Сибирь (урочище Деревянные горы). Урочище представляет собой приподнятую глубоко расчлененную местность близ побережья. Важным элементом ее геологического строения является наличие в составе залегающих с поверхности пород деревянногорской свиты (K_2dr) бурых углей с прослоями глин. Суммарная мощность углей на Деревянногорском месторождении варьирует от 35 до 46 м (Геологическая карта..., 1981; Государственная..., 1999).

Водно-физические и теплофизические свойства пород задавались на основе результатов геологической съемки Новосибирских островов и литературных данных (Гаврильев, 2013; Дортман, 1984). Плотность теплового потока из недр — 60 мВт/м^2 — задавалась на основе анализа данных (Davies, 2013; Девяткин, 1993).

5. Результаты моделирования и обсуждение

Модельное распределение температуры пород по глубине или геотермические градиенты (рис. 5, 3–5), достаточно близкие к фактическим, отличаются от них в интервале глубин 40–120 м. Это обусловлено разреженностью точек наблюдений в скважине. К интервалу 40–120 м приурочена серия пластов малотеплопроводного бурого угля. Бурый уголь весьма существенно увеличивает градиент. Модельные градиенты отражают их связь с последовательностью напластования пород, обладающих разной теплопроводностью; градиент, полученный в процессе измерений, — не отражает. По этой причине модельные мощности ММП (248–278 м) (рис. 5) отличаются в большую сторону от значения мощности (240 м), полученного по экстраполяции данных измерений в скважине.

Для удобства будем оперировать в дальнейшем со значениями мощности ММП. Результаты моделирования в варианте «А» в целом (248–278 м) (см. рис. 5, 3–5) показывают хорошее соответствие нижнему пределу мощности ММП (240 м), полученному В. А. Соловьевым после введения поправок за счет 11-летних колебаний температуры воздуха (Зайцев и др., 1989).

По результатам расчетов в сценарии «Б» мощность ММП составляет 90 м. Это совершенно не соответствует геотермическим данным (см. рис. 4 и 5). Результат моделирования в варианте «В» — мощность ММП, равная 510 м, — характеризует континентальные условия их формирования все 200 тыс. лет. Ведь морские и прибрежно-морские обстановки, свойственные нерпичинской и канарчакской свитам, отнесены, согласно стратиграфической схеме (Геологическая карта..., 1981; Государственная..., 1999), к олигоцен — эоплейстоцену. Результаты расчетов также не соответствуют геотермическим данным скважины «с-А». Проведенный анализ показывает: результаты моделирования отвечают палеогеографической схеме, предусматривающей существование оледенения в МИС-6.

Представления о существовании Новосибирского оледенения в МИС-6 подерживается историей развития криосферы региона в среднем неоплейстоцене — голоцене. На Новосибирских островах описан целый перечень разновозрастных толщ ЛК от МИС-2 до МИС-7, исключая МИС-6 (Тумской, 2023). Вместо ЛК в МИС-6 формировался ледниковый осадочный комплекс, включающий ледниковые и флювиогляциальные отложения. Основная морена маломощна. Но доледниковые отложения (верхний мел — средний неоплейстоцен) интенсивно дисло-

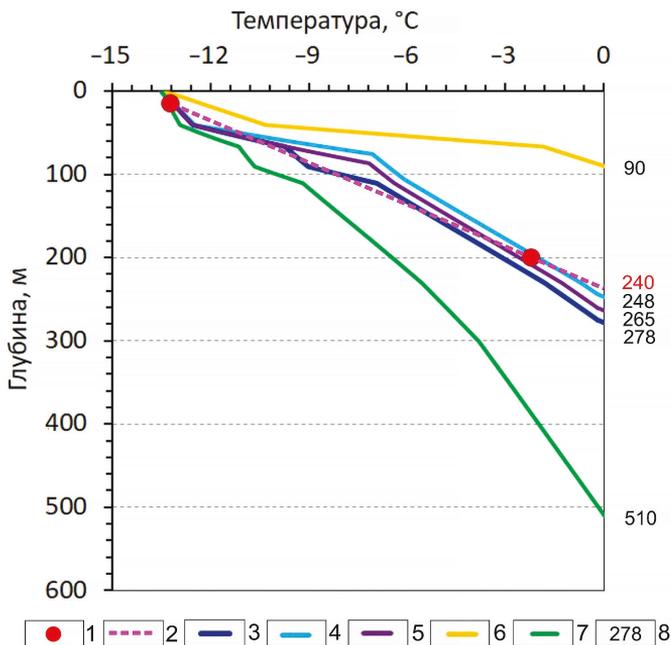


Рис. 5. Термограммы, составленные по фактическим данным и результатам моделирования:

1 — значения температуры пород на глубинах 15 и 200 м, полученные в результате геотермических наблюдений в скважине «с-А» (Зайцев и др., 1989); 2 — термограмма, полученная при экстраполяции фактических данных; 3–5 — модельные термограммы, полученные при задании бурого угля в виде единого пласта: 3 — мощностью 35 м и $\lambda = 0.42$ Вт/м·К, 4 — мощностью 46 м и $\lambda = 0.55$ Вт/м·К, 5 — при задании в виде двух пластов общей мощностью 46 м при $\lambda = 0.55$ и $\lambda = 0.7$ Вт/м·К в верхнем и нижнем слоях соответственно; 6–7 — модельные термограммы при неледниковых вариантах сценария: 6 — в варианте «Б», 7 — в варианте «В»; 8 — значения мощности мерзлых пород (м), полученные при экстраполяции фактических данных (красным) и модельные (черным)

цированы в связи с деятельностью ледника. Именно эту дислоцированную толщу исследователи (Голионко и др., 2019) считают основной чешуйчатой мореной. На ней, как указано выше, залегает абляция морена.

Весьма выразительными являются флювиогляциальные отложения. Они представлены толщей малольдистых алевритов куччугуйской свиты мощностью до 15 м на обоих берегах пролива Дм. Лаптева (Тумской, 2012; Тумской, 2023). Влияние ледника зафиксировано в легком изотопном составе ледяных куччугуйских жил. Он свидетельствует об экстрахолодных условиях флювиогляциального осадконакопления. Оледенение, по-видимому, надо относить к локальным, оно не может сравниваться с таковыми в западном секторе Российской Арктики.

Однако имеют место сомнения и возражения. Представленный выше перечень сведений можно считать ответом на сомнения (Гусев и др., 2021) в возможности существования ледников. Другие исследователи считают ледовые острова Новая Сибирь и Фаддеевский внутригрунтовыми. Так, на примере разреза

в районе полярной станции Марре-Сале на западном берегу п-ва Ямал установлено, что процесс смены морского осадконакопления континентальным на рубеже МИС-3/МИС-2 сопровождается промерзанием в условиях открытой системы при мелеющем море с формированием пластовых льдов внутригрунтового генезиса (Стрелецкая и др., 2013; Стрелецкая, 2021). Этот вывод, полученный с применением широкого комплекса методов, был подтвержден во многих других частях севера Западной Сибири. Внутригрунтовым на этом основании считается также пластовый лед островов Фаддеевский и Новая Сибирь.

И. Д. Стрелецкая обращает внимание исследователей также на то, что стенки обнажений пластовых льдов, многократно оттаивая и промерзая, под воздействием склоновых процессов изменяют свой облик, нередко кардинально. Поэтому рисунок и масштаб наблюдаемых на обнажении пликативных и дизъюнктивных структур может совершенно не соответствовать тем, которые сформировались в процессе оледенения, если таковое имело место.

Однако характер гляциотектонических явлений о. Новая Сибирь совершенно не вписывается в представления о внутригрунтовой природе нижнего мореносодержащего, по В. Е. Тумскому, слоя льда. В ходе специализированных исследований складчато-надвиговых деформаций разрезов мысов Высокий, Жилой, Гористый, Каменный и Утес Деревянных гор в 2016–2017 гг. на о. Новая Сибирь (Голионко и др., 2019) повсеместно была зафиксирована приуроченность к области контакта дислоцированных толщ с горизонтально залегающей регрессивной пачкой верхнеканарчакской свиты подстилающих лед пород и льдов. Наличие кливажа в складках и будинажа вдоль поверхности сместителя деформированных пород (рис. 6, б) свидетельствует о том, что при деформации они находились в мерзлом состоянии: участие пластового льда в деформациях в оттаявшем состоянии априори невозможно (Голионко и др., 2019). Рассогласованности складок на контакте льда и подстилающих отложений среднего неоплейстоцена — основного признака послеледникового изменения строения разреза, — несмотря на потепления, зафиксированные на острове, нет. Строение льда повсеместно демонстрирует неизменность гляциодинамических текстур, отражающих особенности деятельности ледника.

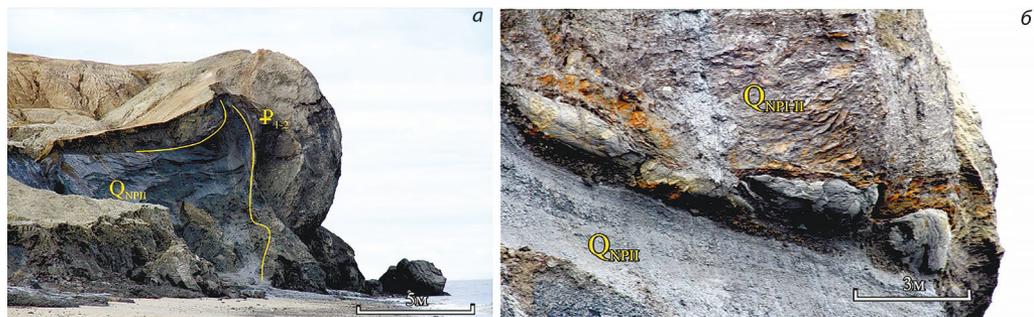


Рис. 6. Характер складчато-надвиговых дислокаций в породах и пластовом льду о. Новая Сибирь (Голионко и др., 2019):

а — ледогрунты среднего неоплейстоцена, деформированные совместно с породами палеоцена-эоцена (м. Высокий); б — будинаж пород среднего неоплейстоцена вдоль надвигового контакта с пластовым льдом среднего неоплейстоцена (м. Каменный)

Другим показателем существования оледенения и отсутствия послеледниковых изменений в макрорельефе является наличие гляциоизостатической 30–40-метровой морской террасы на севере островов Новая Сибирь и Фаддеевский. В ее образовании участвовала также экзарационная деятельность ледника. Своеобразным цоколем террасы является комплекс дислоцированных отложений с пластовым льдом, а аккумулятивной частью — горизонтально залегающая регрессивная прибрежно-морская толща верхне-канарчакской свиты.

На о. Новая Сибирь изучен гидрохимический и изотопный состав пластового льда (Иванова, 2012). По общей минерализации нижний слой льда, в соответствии с классификацией природных вод М. С. Гуревича и Н. И. Толстихина (Шестакова и Орлова, 1984), относится к нормально пресному и очень пресному, верхний слой — к очень пресному и наиболее пресному. В соответствии с классификацией по компонентам химического состава О. А. Алекина (Шестакова и Орлова, 1984), льды Новой Сибири относятся к хлоридно-натриевым.

Безусловно, обмеление моря при смене морских обстановок континентальными способствует формированию инъекционных пластовых льдов (Стрелецкая и др., 2013; Стрелецкая, 2021). Однако этот вывод получен для существенно менее масштабных явлений и в более мягких климатических и геокриологических условиях. Существование субмаринных таликов на рубеже МИС-4/МИС-5, способных обеспечить формирование гигантской инъекционной залежи или залежей вдоль несогласия внутри канарчакской свиты представить невозможно. Ведь ее (или их) суммарная протяженность от восточного берега о. Новая Сибирь до западного берега о. Фаддеевский составляет около 200 км, а мощность достигает двух-трех десятков метров. Не следует забывать, что временные отрезки МИС-5е, с, а были холоднее голоцена. Термокарст имел меньший масштаб. В МИС-5 формировался быччыгыйский ЛК, условия формирования которого сравнимы по температурным характеристикам с МИС-4, МИС-3 и МИС-2.

Необходимо отметить также возможность включения в состав морены и засоленных морских осадков, ведь оледенение островов Новая Сибирь и Фаддеевский происходило в морских условиях. Ю. А. Лаврушин (Лаврушин, 1976) «морской» состав проб с ряда ледников (о. Северо-Восточная Земля, Шпицберген и Земля Адели, Антарктида) связывает с соответствующим составом атмосферных осадков. На о. Новая Сибирь хлоридно-натриевыми оказались пробы из современного снега, снежника, реки; хлоридно-кальциевыми — из озера и сезонно-талого слоя (Иванова, 2012).

В связи с вышеуказанным представляется, что дискуссия о генезисе пластовых льдов еще далека от завершения и настоящая статья в плане указанной дискуссии представляет несомненный интерес.

6. Выводы

1. Постановка и решение задачи формирования мерзлых толщ в соответствии с тремя сценариями, отражающими различные точки зрения на историю геологического развития восточной части островов Анжу, и учетом геотермических данных показали, что единственно приемлемым является сценарий с существованием оледенения в среднем неоплейстоцене.

2. Мощность мерзлоты на о. Новая Сибирь, по данным моделирования, соответствующим геотермии в скважине в районе поднятия Деревянных гор, варьирует от 248 до 278 м в зависимости от теплопроводности и мощности пластов бурого угля верхнего мела.

3. Полученный результат хорошо соответствует распространению и возрасту основных геологических тел региона. Это нерпичинская и канарчакская свиты морских отложений, формировавшихся последовательно с раннего до начала позднего неоплейстоцена, а также разновозрастные ЛК (МИС-2...МИС-5; МИС-7). Обращает на себя внимание отсутствие на островах Новая Сибирь и Фаддеевский пород ледового комплекса МИС-6. Вместо ЛК в МИС-6 формировались флювиогляциальная куччугуйская свита (Тумской, 2012; Тумской, 2023), а также происходили гляциотектонические дислокации в породах верхнего мела — среднего неоплейстоцена.

4. В настоящее время нерешенным остается вопрос о генезисе пластового льда, входящего в состав дислоцированных толщ, перекрываемых горизонтально залегающими канарчакскими отложениями начала позднего неоплейстоцена. На контакте этих толщ наблюдается угловое несогласие. Оно прослеживается на севере островов Новая Сибирь и Фаддеевский на протяжении 200 км. Не важно, каким при опробовании оказывается химический или изотопный состав современного льда на контакте указанных толщ. Важно то, что названное несогласие имеет очень большую протяженность и своим формированием связано с существованием ледникового льда на рубеже среднего и верхнего неоплейстоцена.

Благодарности

Авторы благодарят И. Д. Стрелецкую за обстоятельный доклад по проблемам генезиса пластовых льдов на семинарах, организованных в 2021 г. ИГ РАН и кафедрой криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова; Н. А. Шполянскую и А. Ю. Деревягина за обсуждение результатов исследований; В. Е. Тумского за многолетнее сотрудничество.

Литература

- Анисимов, М. А., Тумской, В. Е., Иванова, В. В. (2006). Пластовые льды Новосибирских островов как реликт древнего оледенения. *Материалы гляциологических исследований*, 101, 143–145.
- Басилян, А. Э., Анисимов, М. А., Никольский, П. А. (2009). Оледенение Новосибирских островов: определяющий фактор строения квартера. В: *Труды XLII Тектонического совещания*. Т. 1. М.: ГЕОС, 43–45.
- Басилян, А. Э. и Никольский, П. А. (2007). Опорный разрез четвертичных отложений мыса Каменный (Новая Сибирь). *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*, 67, 76–84.
- Басилян, А. Э., Никольский, П. А., Максимов, Ф. Е., Кузнецов, В. Ю. (2010). Возраст следов покровного оледенения Новосибирских островов по данным $^{230}\text{Th}/\text{U}$ — датирования раковин моллюсков. В: *Строение и история развития литосферы*. М.: Paulsen, 506–514.
- Гаврилов, А. В. (2008). *Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене — голоцене)*. Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М.
- Гаврильев, Р. Г. (2013). *Каталог теплофизических свойств горных пород Северо-Востока России*. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН.
- Геокриологическая карта СССР, масштаб 1:2 500 000* (1996). Винница: Гос. картограф. фабрика.
- Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток* (1989). М.: Недра.

- Геологическая карта. Масштаб 1:200 000* (1981). Листы S-55-VII, VIII, IX; X, XI, XII. 1-е изд. Л.: Аэрогеология.
- Голионко, Б. Г., Базилян, А. Э., Никольский, П. А., Костылева, В. В. (2019). Складчато-надвиговые деформации о. Новая Сибирь (Новосибирские острова, Россия): возраст, морфология и генезис структур. *Геотектоника*, 6, 46–64. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019646-64>
- Государственная геологическая карта Российской Федерации (новая серия). Масштаб 1:1 000 000* (1998). Лист S-53-55 (Новосибирские острова). СПб.: ВСЕГЕИ.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации (новая серия). Масштаб 1:1 000 000* (1999). Лист S-53-55 (Новосибирские острова). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ.
- Гусев, Е. А., Рыбалко, А. Е., Большианов, Д. Ю., Макаров, А. С., Рябчук, Д. В., Жамойда, В. А., Сергеев, А. Ю., Бартова, А. В., Крылов, А. А., Яржембовский, Я. Д., Костромина, Н. А., Семенов, П. Б., Малышев, С. А., Горбунов, Д. А., Комаров, А. Ю. (2021). К вопросу о плейстоценовом оледенении Восточно-Арктического шельфа. В: *Геология морей и океанов: мат-лы XXIV Междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии*. Т. IV. М.: ИО РАН, 45–50. <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-7-7>
- Девяткин, В. Н. (1993). *Тепловой поток криолитозоны Сибири*. Новосибирск: Наука.
- Деревягин, А. Ю., Чижов, А. Б., Майер, Х. (2010). Температурные условия зим Лаптевоморского региона за последние 50 тыс. лет в изотопной записи повторно-жильных льдов. *Криосфера Земли*, XIV (1), 32–40.
- Дортман Н. Б., ред. (1984). *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справочник геофизика*. М.: Недра.
- Ершов, Э. Д., ред. (1998). *Основы геокриологии. Ч. 3. Региональная и историческая геокриология мира*. М.: Изд-во МГУ.
- Зайцев, В. Н. (1998). Криолитозона северной и северо-восточной Азии. Арктические Приморские низменности. В: *Основы геокриологии. Ч. 3. Региональная и историческая геокриология мира*. М.: Изд-во МГУ, 307–327.
- Зайцев, В. Н., Соловьев, В. А., Плетнев, В. Е. (1989). Яно-Колымский регион. В: Э. Д. Ершов, ред., *Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток*. М.: Недра, 240–279.
- Иванова, В. В. (2012). Геохимия пластовых льдов острова Новая Сибирь (Новосибирские острова, Российская Арктика) как отражение условий их генезиса. *Криосфера Земли*, XVI (1), 56–70.
- Каплина, Т. Н. (1987). *Закономерности развития криолитогенеза в позднем кайнозое на аккумулятивных равнинах северо-востока Азии*. Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск: ИМЗ СО АН СССР.
- Каплина, Т. Н. и Кузнецова, И. Л. (1975). Геотемпературная и климатическая модель эпохи накопления осадков едомной свиты Приморской низменности Якутии. *Проблемы палеогеографии лесовых и перигляциальных областей*. М.: Ин-т географии АН СССР, 170–174.
- Карта четвертичных образований масштаба 1:2 500 000 территории Российской Федерации. Пояснительная записка* (2013). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ.
- Конищев, В. Н. (1999). Эволюция температуры пород арктической зоны России в верхнем кайнозое. *Криосфера Земли*, III (4), 39–47.
- Лаврушин, Ю. А. (1976). *Строение и формирование основных морен материковых оледенений*. М.: Наука.
- Павлова, Е. Ю., Анисимов, М. В., Дорожкина, М. В., Питулько, В. В. (2010). Следы древнего оледенения на о. Новая Сибирь (Новосибирские острова) и природные условия района в позднем неоплейстоцене. *Лед и снег*, 110 (2), 85–92.
- Романовский, Н. Н., Гаврилов, А. В., Пустовойт, Г. В., Холодов, А. Л., Кассенс, Х., Хуббертен, Х.-И., Ниссен, Ф. (1997). Распространение субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых. *Криосфера Земли*, I (3), 9–18.
- Соловьев, В. А. (1981). Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей). *Криолитозона арктического шельфа*. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 28–38.
- Соловьев, В. А., Гинсбург, Г. Д., Телпнев, Е. В., Михалюк, Ю. Н. (1987). Криоготермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л.: ПГО «Севморгеология».

- Стрелецкая, И. Д. (2021). *Пластовые льды и проблема их генезиса. Методы изучения подземных льдов и мерзлых отложений*. Лекция из цикла «Вечная мерзлота в пространстве и времени». [online] Доступно на: <https://www.youtube.com/watch?v=O11z98PObRM> [Дата доступа 15.02.2023].
- Стрелецкая, И. Д., Васильев, А. А., Облогов, Г. Е., Матюхин, А. Г. (2013). Изотопный состав подземных льдов Западного Ямала (Марре-Сале). *Лед и снег*, 122 (2), 83–92. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-2-83-92>
- Тумской, В. Е. (2012). Особенности криолитогенеза отложений северной Якутии в среднем неоплейстоцене — голоцене. *Криосфера Земли*, XVI (1), 12–21.
- Тумской, В. Е. (2023). *Криостратиграфия и история геологического развития четвертичных отложений Арктической Якутии*. Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск.
- Тумской, В. Е. и Базилян, А. Э. (2006). Опорный разрез четвертичных отложений о. Большой Ляховский (Новосибирские острова). *Проблема корреляции плейстоценовых событий на Русском Севере*. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ.
- Ушаков, С. А. и Красс, М. С. (1972). *Сила тяжести и вопросы механики недр Земли*. М.: Недра.
- Фотиев, С. М. (1997). Гидрохимический метод оценки палеотемпературы пород на Арктическом побережье. *Криосфера Земли*, I (2), 29–35.
- Шер, А. В. (1997). Природная перестройка в Восточно-Сибирской Арктике на рубеже плейстоцена и голоцена и ее роль в вымирании млекопитающих и становлении современных экосистем (сообщение 1). *Криосфера Земли*, I (1), 21–29.
- Шестакова, В. М. и Орлова, М. С. (1984). *Гидрогеология*. М.: Изд-во МГУ.
- Andreev, A. A., Tarasov, P. E., Schwamborn, G., Ilyashuk, B., Ilyashuk, E., Bobrov, A. A., Klimanov, V. A., Rachold, V., Hubberten, H. W. (2004). Holocene paleoenvironmental records from Nicolay Lake, Arctic Russia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209, 197–217. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.010>
- Bauch, H. A., Muller-Lupp, T., Taldenkova, E., Spielhagen, R. F., Kassens, H., Grootes, P. M., Thiede, J., Heinemeier, J., Petryashov, V. V. (2001). Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. *Global and Planetary Change*, 31, 125–139. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00116-3)
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdóttir, A. E., Jouzel, J., Bond, G. (1993). Evidence for general instability of past climate from 250-kyr ice-core records. *Nature*, 364, 218–220. <https://doi.org/10.1038/364218a0>
- Davies, J. H. (2013). Global map of solid Earth surface heat flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14. <https://doi.org/10.1002/ggge.20271>
- Gavrilov, A., Malakhova, V., Pizhankova, E., Popova, A. (2020). Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf. *Geosciences*, 10 (12), 484. <https://doi.org/10.3390/geosciences10120484>
- Malakhova, V. V. and Eliseev, A. V. (2020). Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments. *Global and Planetary Change*, 192, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103249>
- Opel, T., Wetterich, S., Meyer, H., Dereviagin, A. Y., Fuchs, M. C., Schirrmeister, L. (2017). Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait). *Climate of the Past*, 13, 587–611. <https://doi.org/10.5194/cp-13-587-2017>
- Schirrmeister, L., Grosse, G., Schwamborn, G., Andreev, A., Meyer, H., Kunitsky, V. V., Kuznetsova, T. V., Dorozhkina, M. V., Pavlova, E. Y., Bobrov, A. A., Oezen, D. (2003). Late Quaternary History of the Accumulation Plain North of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A Multidisciplinary Approach. *Polar Geography*, 27 (4), 277–319. <https://doi.org/10.1080/789610225>
- Wetterich, S., Tumskey, V., Rudaya, N., Kuznetsov, V., Maksimov, F., Opel, T., Meyer, H., Andreev, A., Schirrmeister, L. (2016). Ice complex permafrost of MIS5 age in the Dmitry Laptev Strait coastal region (East Siberian Arctic). *Quaternary Science Reviews*, 147, 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.11.016>

Статья поступила в редакцию 22 июля 2022 г.
Статья рекомендована к печати 10 ноября 2023 г.

Контактная информация:

Гаврилов Анатолий Васильевич — gavrilov37@bk.ru

Малахова Валентина Владимировна — malax@sscc.ru

Пижанкова Елена Ивановна — pijankova@yandex.ru

Попова Александра Александровна — PopovaAA@sev-iz.ru

Estimation of the permafrost thickness of the New Siberia Island based on geothermal data and numerical modeling*

A. V. Gavrilov¹, V. V. Malakhova², E. I. Pizhankova¹, A. A. Popova³

¹ Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

² Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics

of the Russian Academy of Sciences,

6, pr. Akademika Lavrent'eva, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ LLC "Northern Research",

4, Kievskoe shosse, Moscow, 108811, Russian Federation

For citation: Gavrilov, A. V., Malakhova, V. V., Pizhankova, E. I., Popova, A. A. (2023). Estimation of the permafrost thickness of the New Siberia Island based on geothermal data and numerical modeling. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 68 (4), 622–645. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.401> (In Russian)

The current ideas about the permafrost thickness on the New Siberia Island are very ambiguous both in terms of forming factors and in its magnitude (from 240 to 370 m), and in general are based on the assumption of the Pliocene beginning of rock freezing. In the last 20 years, new data have been obtained on the history of the region's development in the Neopleistocene. They include the long existence of the New Siberia Island in marine conditions, which excluded the rocks freezing at that time, as well as the development of glaciation in the Middle Neopleistocene. These data indicate a significantly later onset of freezing of the island, which correlates with the nonstationarity of the temperature field of the frozen strata. The authenticity of the data is debated. The article is devoted to assessing the thickness of permafrost in accordance with three possible scenarios, allowing to take into account different points of view on the geological development of the region. The assessment is made using numerical modeling of the formation of frozen strata over the past 200 thousand years. One scenario includes the existence of glaciation during the Middle Neopleistocene, while in the other two it is absent. The last two scenarios differ in the stratigraphic schemes used. The reliability of the scenarios is assessed based on a comparison of the modeling results for each of them with geothermal data in a well on the island of New Siberia, obtained in the 1970s. The comparison results show that only the version with the existence of a glacier is consistent with the geothermal data. According to the data obtained, freezing of the island began under the glacier at the end of the Middle Neopleistocene, which existed in coastal-marine conditions. The most active increase in the frozen strata thickness dates back to the late Neopleistocene due to the drainage of the island. The obtained result is in agreement with new data on the age of the

* The study was carried out within the framework of the state assignment of the Laboratory of Geological Environment Protection of the Geological Faculty of Moscow State University (project no. 16555398) (in terms of constructing paleogeographic scenario) and with the support by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (NIOKTR no. 123081400010-2, the agreement no. 075-03-2023-506/1) (in terms of numerical modeling and scenario verification).

main geological bodies of the region, as well as with the idea of the glaciotectonic nature of dislocations in the Cretaceous — Middle Neopleistocene rocks.

Keywords: New Siberian Islands, scenario of geological development, glaciation, glacioisostatic movements, permafrost, paleotemperature scenario, numerical modeling.

References

- Andreev, A. A., Tarasov, P. E., Schwamborn, G., Ilyashuk, B., Ilyashuk, E., Bobrov, A. A., Klimanov, V. A., Rachold, V., Hubberten, H. W. (2004). Holocene paleoenvironmental records from Nicolay Lake, Arctic Russia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209, 197–217. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.010>
- Anisimov, M. A., Tumskey, V. E., Ivanova, V. V. (2006). The subsurface ice at Novosibirskie Islands as a relic of the ancient glaciation. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovaniy*, 101, 143–145. (In Russian)
- Basilyan, A. E., Anisimov, M. A., Nikolsky, P. A. (2009). Glaciation of the New Siberian Islands: a determining factor in the structure of the quarter. In: *Trudy XLII Tektonicheskogo soveshchaniia*. Vol. 1. Moscow: GEOS Publ., 43–45. (In Russian)
- Basilyan, A. E. and Nikolsky, P. A. (2007). Reference section of Quaternary deposits of Cape Kamenny (New Siberia). *Byulleten' Komissii po izucheniiu chetvertichnogo perioda*, 67, 76–84. (In Russian)
- Basilyan, A. E., Nikolskiy, P. A., Maksimov, F. E., Kuznetsov, V. Yu. (2010). Age of cover glaciation of the New Siberian islands based on ²³⁰Th/U-dating of mollusk shells. In: *Structure and history of the development of the lithosphere*. Moscow: Paulsen Publ., 506–514. (In Russian)
- Bauch, H. A., Muller-Lupp, T., Taldenkova, E., Spielhagen, R. F., Kassens, H., Grootes, P. M., Thiede, J., Heine-meier, J., Petryashov, V. V. (2001). Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. *Global and Planetary Change*, 31, 125–139. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00116-3)
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjörnsdottir, A. E., Jouzel, J., Bond, G. (1993). Evidence for general instability of past climate from 250-kyr ice-core records. *Nature*, 364, 218–220. <https://doi.org/10.1038/364218a0>
- Davies, J. H. (2013). Global map of solid Earth surface heat flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14. <https://doi.org/10.1002/ggge.20271>
- Dereviagin, A. Yu., Chizhov, A. B., Meyer, H. (2010). Winter temperature conditions Laptev Sea region during the last 50 thousand years in the isotopic records of ice wedges. *Kriosfera Zemli*, 14 (1), 32–40. (In Russian)
- Devyatkin, V. N. (1993). *Heat flow in the permafrost zone of Siberia*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Dortman, N. B., ed. (1984). *Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Handbook of Geophysics*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Ershov, E. D., ed. (1998). *Fundamentals of geocryology. Part 3. Regional and historical geocryology of the world*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Fotiev, S. M. (1997). Hydrochemical method for estimation of paleotemperature of rocks on the arctic coast. *Kriosfera Zemli*, 1 (2), 29–35. (In Russian)
- Gavrilov, A. V. (2008). *Cryolithozone of the Arctic shelf of Eastern Siberia (current state and history of development in the Middle Pleistocene — Holocene)*. PhD thesis abstract. Moscow. (In Russian)
- Gavrilov, A., Malakhova, V., Pizhankova, E., Popova, A. (2020). Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf. *Geosciences*, 10 (12). <https://doi.org/10.3390/geosciences10120484>
- Gavril'ev, R. G. (2013). *Catalog of thermophysical properties of rocks in the North-East of Russia*. Yakutsk: Izdatel'stvo instituta merzlotovedeniia SB RAN Publ. (In Russian)
- Geocryological map of the USSR. Scale 1:2,500,000* (1996). Sheet 3. Vinnitsa: Gosudarstvennaia kartograficheskaya fabrika. Vinnitsa. (In Ukraine)
- Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East* (1989). Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Geological map. Scale 1st ed.* (1981). Sheets S-55–VII, VIII, IX; X, XI, XII. St. Petersburg: Aerogeologiya Publ.; VSEGEI Publ.
- Golionko, B. G., Basilyan, A. E., Nikolsky, P. A., Kostyleva, V. V. (2019). Fold-thrust deformations of the isl. New Siberia (Novosibirsky Islands, Russia): Age, morphology and genesis of structures. *Geotektonika*, 6, 46–64. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019646-64> (In Russian)

- Gusev, E. A., Rybalko, A. E., Bol'shiyanov, D. Yu., Makarov, A. S., Ryabchuk, D. V., Zhamojda, V. A., Sergeev, A. Yu., Bartova, A. V., Krylov, A. A., Yarzhembovskij, Ya. D., Kostromina, N. A., Semenov, P. B., Malyshev, S. A., Gorbunov, D. A., Komarov, A. Yu. (2021). K voprosu o pleistotsenovom oledenении Vostochno-Arkticheskogo shel'fa. In: *Geologii morei i okeanov: materialy XXXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii*. Vol. IV. Moscow: IO RAN Publ., 45–50. <https://doi.org/10.29006/978-5-6045110-7-7> (In Russian)
- Ivanova, V. V. (2012). Geochemical features of formation of massive ground ice bodies (New Siberia Island, Siberian Arctic) as the evidence of their genesis. *Kriosfera Zemli*, 16 (1), 56–70. (In Russian)
- Kaplina, T. N. (1987). *Patterns of development of cryolithogenesis in the Late Cenozoic on the accumulative plains of northeast Asia*. PhD thesis abstract. Yakutsk. (In Russian)
- Kaplina, T. N. and Kuznetsova, I. L. (1975). Geotemperature and climatic model of the sediment accumulation epoch of the Yedomnaya Suite of the Primorskaya Lowland of Yakutia. In: *Problemy paleogeografii lessovykh i perigl'yatsial'nykh oblastey*. Moscow: Institut geografii AN SSSR Publ., 170–174. (In Russian)
- Konishchev, V. N. (1999). Evolution of ground temperature of Russian Arctic zone in Upper Cenozoic. *Kriosfera Zemli*, 3 (4), 39–47. (In Russian)
- Lavrushin, Yu. A. (1976). *Structure and formation of the main moraines of continental glaciations*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Malakhova, V. V. and Eliseev, A. V. (2020). Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments. *Global and Planetary Change*, 192, 103249. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103249>
- Map of Quaternary formations of a scale of 1:2,500,000 for the territory of the Russian Federation. Explanatory note* (2013). St. Petersburg, VSEGEI Publ.
- Opel, T., Wetterich, S., Meyer, H., Dereviagin, A. Yu., Fuchs, M. C., Schirrmeister, L. (2017). Ground-ice stable isotopes at the Oyogos Yar Coast (Dmitry Laptev Strait) indications — for Late. *Climate of the Past*, 13, 587–611.
- Pavlova, E. Yu., Anisimov, M. V., Dorozhkina, M. V., Pitulko, V. V. (2010). Traces of ancient glaciation on New Siberia Island (Novosibirskie Islands) and an regional environment in the Late Neo-pleistocene. *Led i sneg*, 110 (2), 85–92. (In Russian)
- Romanovskii, N. N., Gavrilov, A. V., Pustovoyt, G. V., Holodov, A. L., Kassens, H., Hubberten, H.-I., Nissen, F. (1997). Off-shore permafrost distribution on the Laptev Sea shelf. *Kriosfera Zemli*, 1 (3), 9–18. (In Russian)
- Schirrmeister, L., Grosse, G., Schwamborn, G., Andreev, A., Meyer, H., Kunitsky, V. V., Kuznetsova, T. V., Dorozhkina, M. V., Pavlova, E. Y., Bobrov, A. A., Oezen, D. (2003). Late Quaternary History of the Accumulation Plain North of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A Multidisciplinary Approach. *Polar Geography*, 27 (4), 277–319. <https://doi.org/10.1080/789610225>
- Sher, A. V. (1997). Environmental restructuring at the Pleistocene/Holocene boundary in the East Siberian Arctic and its role in mammalian extinction and establishment of modern ecosystems (communication 1). *Kriosfera Zemli*, 1 (1), 21–29. (In Russian)
- Shestakov, V. M. and Orlov, M. S., eds (1984). *Hydrogeology*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Soloviev, V. A. (1981). Forecast of the distribution of relict subaqueous frozen zone (on the example of the East Arctic seas). In: *Kriolitozona arkticheskogo shel'fa*. Yakutsk: IMZ SO AN SSSR Publ., 28–38. (In Russian)
- Solov'ev, V. A., Ginsburg, G. D., Telepnev, E. V., Mihalyuk, Yu. N. (1987). Kriogeotermya i gidraty prirodno-gaza v nedrah Severnogo Ledovitogo okeana. Leningrad: PGO "Sevmorgeologii" Publ. (In Russian)
- State geological map of the Russian Federation (new series). Scale 1:1,000,000* (1998). Sheet S-53–55 (Novosibirskie Islands). St. Petersburg: VSEGEI Publ. (In Russian)
- State geological map of the Russian Federation (new series). Scale 1:1,000,000* (1999). Sheet S-53–55 (Novosibirskie Islands). Explanatory memorandum. St. Petersburg: VSEGEI Publ. (In Russian)
- Streletskaya, I. D. Vasiliev, A. A., Oblogov, G. E., Matyukhin, A. G. (2013). Isotopic composition of ground ice in Western Yamal (Marre-Sale). *Led i sneg*, 122 (2), 83–92. (In Russian)
- Streletskaya, I. D. (2021). *Formation ice and the problem of their genesis. Methods for studying underground ice and frozen deposits*. Lecture from the cycle "Permafrost in Space and Time". [online] Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=O11z98PObRM> [Accessed 15.02.2023]. (In Russian)

- Tumskoy, V.E. (2012). Peculiarities of cryolithogenesis in Northern Yakutia (Middle Neopleistocene to Holocene). *Kriosfera Zemli*, 16 (1), 12–21. (In Russian)
- Tumskoy, V.E. (2023). *Cryostratigraphy and history of geological development of Quaternary deposits of Arctic Yakutia*. PhD thesis abstract. Yakutsk. (In Russian)
- Tumskoy, V.E. and Basilyan, A.E. (2006). Reference section of the Quaternary deposits of Bolshoi Lyakhovskiy Island (Novosibirskie Islands). In: *Problema koreliatsii pleistotsenovykh sobytii na Russkom Severe*. St. Petersburg: VSEGEI Publ. (In Russian)
- Ushakov, S.A. and Krass, M.S. (1972). *Gravity and questions of mechanics of the Earth's interior*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Wetterich, S., Tumskoy, V., Rudaya, N., Kuznetsov, V., Maksimov, F., Opel, T., Meyer, H., Andreev, A., Schirrmeister, L. (2016). Ice complex permafrost of MIS5 age in the Dmitry Laptev Strait coastal region (East Siberian Arctic). *Quaternary Science Reviews*, 147, 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.11.016>
- Zaitsev, V.N. (1998). Permafrost zone of northern and northeastern Asia. Arctic Primorsky lowlands. In: *Osnovy geokriologii. Ch. 3. Regional'naya i istoricheskaya geokriologiya mira*. Moscow: Moscow University Press, 307–327. (In Russian)
- Zaitsev, V.N., Solov'ev, V.A., Pletnev, V.E. (1989). Yano-Kolyma region. In: E.D. Ershov, ed., *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'nii Vostok*. Moscow: Nedra Publ., 240–279. (In Russian)

Received: July 22, 2022
Accepted: November 10, 2023

Authors' information:

Anatolii V. Gavrilov — gavrilo37@bk.ru

Valentina V. Malakhova — malax@sscc.ru

Elena I. Pizhankova — pijankova@yandex.ru

Alexandra A. Popova — PopovaAA@sev-iz.ru