

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

Посвящается светлой памяти профессора
Владимира Алексеевича Кудрявцева

УДК 551.345

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОВРЕМЕННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ
И СТРОЕНИЯ ШЕЛЬФОВОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

Н.Н. Романовский, В.Е. Тумской

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, геологический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, Россия, nromanovsky@rambler.ru*

Рассмотрены общие принципы разработанного авторами и их коллегами ретроспективного подхода к изучению современного строения и истории развития криолитозоны восточно-арктического шельфа. Он основан на математическом моделировании динамики шельфовой криолитозоны с использованием комплекса мерзлотно-геологических и палеогеографических сведений о районе исследований. В условиях чрезвычайно слабой изученности криолитозоны восточно-арктического шельфа ретроспективный подход позволяет оценить распространение и мощности мерзлых и охлажденных пород на его территории, зоны стабильности гидратов газов, реконструировать их эволюцию в течение среднего–позднего неоплейстоцена и голоцена. Рассмотрены основные преимущества и недостатки ретроспективного подхода и особенности математического моделирования шельфовой криолитозоны, показаны направления его дальнейшего развития.

Криолитозона арктического шельфа, палеогеография, математическое моделирование, море Лаптевых

RETROSPECTIVE APPROACH TO THE ESTIMATION OF THE CONTEMPORARY EXTENSION
AND STRUCTURE OF THE SHELF CRYOLITHOZONE IN EAST ARCTIC

N.N. Romanovskii, V.E. Tumskey

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,
119991, Moscow, Leninskie Gory, Russia, nromanovsky@rambler.ru*

General principles of retrospective approach to the study of the contemporary structure and history of evolution of cryolithozone of the East Arctic shelf have been considered. This approach is based on mathematical modelling of shelf cryolithozone dynamics, using the complex of geocryological, geological, and paleogeographic data from investigation area. In the conditions of the extremely poorly examined East Arctic shelf cryolithozone, the retrospective approach permits to estimate the distribution and thickness of frozen and cooled ground on this territory, the gas hydrate stability zones, to reconstruct their dynamics during Middle-Late Neopleistocene and Holocene. The basic advantages and shortcomings of the retrospective approach and the peculiarities of mathematical modelling have been examined. The further lines of development of this method have been revealed.

Cryolithozone of the Arctic shelf, paleogeography, mathematical modelling, Laptev Sea

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени субмаринная криолитозона восточной части арктического шельфа России изучена чрезвычайно слабо. В отличие от наземных исследований любые геологические изыскания на арктическом шельфе сопряжены со значительными техническими трудностями и рисками. Сведения о шельфовой криолитозоне, полученные в результате бурения с морского льда,

крайне ограничены. Геологами “Севморгео” и НИИГА (ныне – ВНИИОкеангеология) были пройдены буровые профили со льда в проливах Санникова и Дмитрия Лаптева в связи с разведкой россыпных месторождений олова. Эти материалы и сейчас остаются уникальными, тем более что буровые профили распространялись и на побережье, а в ходе работ участвовали мерзлотоведы

[Фартышев, 1978; Соловьев, 1981; Телепнев, 1981]. Кроме того, в прибрежной зоне проводились специализированные мерзлотные исследования [Григорьев Н.Ф., 1966; Молочушкин, Гаврильев, 1970; Катасонов, Пудов, 1972; Григорьев, 2008].

На большей части шельфа основной упор делался на сейсмические и сейсмоакустические исследования. Однако качественных геофизических материалов по восточному шельфу, особенно по приповерхностным горизонтам, до недавнего времени почти не было. Морские геологи и геофизики недостаточно знакомы с “вечной мерзлотой”, а для специалистов-мерзловедов такие данные были малодоступны.

Проведенные исследования показали, что в прибрежной зоне шельфа присутствуют как толщи многолетнемерзлых пород (ММП), так и засоленных охлажденных, хотя подошвы ММП и криолитозоны в целом не вскрыты. Фактических данных о распространении и мощности криолитозоны на шельфе с глубинами моря более 20 м, ее строении и состоянии пород практически нет. Во второй половине XX в. преобладало представление о том, что в прибрежной зоне мерзлые толщи образовались во время осушения шельфа и были затоплены при последующем подъеме уровня моря, т. е. являются “континентально-погруженными”, по терминологии И.Я. Баранова [1964]. Считалось, что под морем мерзлые толщи протаивают и, чем дальше мерзлая толща находится в затопленном состоянии, тем на большую глубину она оттаивает. Эти представления подтверждаются результатами бурения в прибрежной зоне до глубин моря 5–10 м (в первую очередь в районе бухты Тикси и Ванькиной губы), где кровля мерзлых пород заглубляется по мере удаления от берега [Григорьев Н.Ф., 1966; Молочушкин, Гаврильев, 1970; Катасонов, Пудов, 1972; Григорьев, 1993]. Эта точка зрения существует и в настоящее время [Григорьев, 2008]. По мнению авторов настоящей статьи, такое погружение кровли ММП в прибрежной зоне вполне закономерно. Как было показано многочисленными наблюдениями в разных районах Арктики [Жигарев, 1997], вода имеет низкую положительную температуру до глубин моря 8–10 м за счет интенсивного прогрева в летнее время. Поэтому естественно, что чем дальше ММП находится в прибрежной зоне, тем глубже многолетнее протаивание затопленных ММП. Между тем в открытом море, на глубинах более 10–15 м, температура воды становится отрицательной. Следовательно, увеличение глубины многолетнего оттаивания ММП с поверхности по мере увеличения глубин моря не является общей закономерностью. Сведенные вместе данные по буровым профилям в море Лаптевых [Григорьев, 2008] свидетельствуют на данный момент только

о существенно более сложных закономерностях в поведении кровли ММП на шельфе.

Впервые о возможности существования мощной криолитозоны (до 600–800 м) на шельфе моря Лаптевых писал А.И. Фартышев [1993], опираясь на собственные полевые наблюдения, расчетные данные, а также общие соображения и результаты бурения на шельфе моря Бофорта. Предположения о мощности ММП до 100–200 м на отдельных участках шельфа высказывал также В.А. Соловьев [1981].

Авторы настоящей работы вместе с коллегами (А.В. Гавриловым, А.Л. Холодовым, А.А. Елисеевой, Г.С. Типенко и др.) поставили перед собой цель – оценить распространение, мощность и строение шельфовой криолитозоны в пределах моря Лаптевых, а также зоны стабильности гидратов газов. Анализ имеющегося фактического материала об объекте исследований показал, что его не достаточно для достижения этой цели. В результате в ходе работ был предложен, развит и обоснован ретроспективный подход для оценки современного распространения и строения шельфовой криолитозоны и ее эволюции в прошлом.

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ШЕЛЬФОВОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

Ретроспективный подход, предложенный коллективом под руководством Н.Н. Романовского, методологически близок к разрабатываемому в мерзловедении с середины прошлого столетия направлению, названному мерзлотным прогнозом. Целью мерзлотного прогноза было решение проблемы научного предсказания изменения мерзлотных условий под воздействием природных климатических изменений и антропогенного влияния. Основоположителем этого направления был выдающийся ученый профессор Владимир Алексеевич Кудрявцев – создатель кафедры мерзловедения на геологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Мерзлотный прогноз требует учета многочисленных сложных взаимосвязей между атмосферой, растительностью, снежным покровом, почвой и подстилающими горными породами. В наибольшей степени он направлен на предсказание изменения мерзлотных характеристик верхних слоев литосферы для периода в первые десятки лет. В значительно меньшей степени прогнозируются мощность криолитозоны, ее строение и мерзлотно-гидрогеологические условия, т. е. те параметры мерзлотной обстановки, которые формируются геологически длительное время. За это время существенно и неоднократно изменяются мерзлотные условия, поскольку происходят средне- и длиннопериодные похолодания и потепления, тектонические движения, колебания уровня моря, оледенения и дегляциации, а также выз-

ванные ими явления гляциоэвстазии, гляциоизостазии и др. Результаты развития указанных природных процессов и явлений сформировали современную природную среду и в ходе применения мерзлотного прогноза стали отправной точкой дальнейших исследований, не являясь объектом его специального рассмотрения. Методы оценки влияния геологически длительных природных событий на изменения мерзлотных условий в настоящее время разработаны недостаточно.

Ретроспективный подход является дальнейшим развитием и расширением мерзлотного прогноза, ориентированным в первую очередь на изучение мощности криолитозоны и ее динамики не только на суше, но и на арктическом шельфе. Его применение предполагает использование сведений о длиннопериодных и региональных климатических, палеогеографических и геологических событиях, определяющих современные распространение, мощность и строение криолитозоны. Его можно также образно назвать ретроспективным прогнозом. Этот подход разрабатывался и реализовывался на протяжении многих лет на примере района шельфа моря Лаптевых. Исследования входили в российско-германскую программу "Система моря Лаптевых". В них принимал непосредственное участие профессор Ханс-Вольфганг Хуббертен (H.-W. Hubberten), директор Потсдамского отделения Института полярных и морских исследований им. А. Вегенера, ныне являющийся президентом Международной ассоциации мерзловедения (ИРА).

Методологически применение ретроспективного подхода состоит из трех этапов.

1. Сбор всех имеющихся сведений о мерзлотных условиях района и их изменениях как во времени, так и в пространстве. Это подразумевает изучение мерзлотно-геологического строения и стратиграфии четвертичных отложений на шельфе и прилегающей суше, а также реконструкцию палеогеографических условий осадконакопления.

2. Расчет мощности шельфовой криолитозоны и криолитозоны суши с использованием современного аппарата математического моделирования в различных точках шельфа и прилегающей суши. Моделирование осуществляется с необходимым количеством вариантов расчетов для изучения влияния тех или иных факторов и параметров природной обстановки и оценки варибельности результатов в зависимости от качества входных данных.

3. Геолого-географическая и мерзлотная интерпретация полученных результатов моделирования, проверка их прямыми или косвенными методами на достоверность. Зная свойства пород и отложений, можно предсказать их состояние (мерзлое, талое или охлажденное).

Таким образом, при ретроспективном подходе объединяются и взаимно дополняют друг друга результаты геолого-палеогеографических исследований и возможности современных методов математического и компьютерного моделирования. "Ядром" ретроспективного подхода к изучению шельфовой криолитозоны является математическое моделирование динамики мощности криолитозоны.

Как известно, при математическом моделировании основой для получения достоверных результатов является корректное задание краевых условий. Для моделирования динамики мощности криолитозоны требуется знание температурных условий на верхней границе модели для всего рассматриваемого периода времени, значений теплового потока на нижней границе модели, а также теплофизических свойств пород и отложений, формирующих разрез.

Первый этап применения ретроспективного подхода к изучению динамики мощности криолитозоны шельфа моря Лаптевых – сбор сведений об истории развития природной среды Северной Якутии в среднем–позднем неоплейстоцене и голоцене и о геолого-тектоническом строении района. В результате геологических и мерзлотных исследований четвертичных отложений Северной Якутии были получены многочисленные палеоландшафтные и палеомерзлотные региональные сведения для приморских низменностей и арктических островов. Появились и были апробированы различные методы физического датирования отложений, разработаны методы восстановления былых среднегодовых температур пород, предложенные Т.Н. Каплиной, В.Т. Балобаевым, В.Н. Конищевым, А.А. Величко, Н.Н. Романовским, Ю.К. Васильчуком и др. Однако общим недостатком всех палеогеографических данных об истории природной среды региона, полученных по отдельным разрезам кайнозойских отложений, является их дискретность во времени и пространстве и обусловленная этим сложность их корреляции между собой. Сложности в применении метода актуализма на этой территории (в настоящее время часто не существует аналогов тех ландшафтов, которые были здесь широко распространены в среднем и позднем неоплейстоцене) затрудняют интерпретацию как изученных мерзлотно-геологических разрезов четвертичных отложений, так и результатов аналитических исследований образцов. Поэтому для Восточной Арктики до настоящего времени не существует региональной непрерывной летописи изменений климата и ландшафтов.

Чтобы решить проблему задания граничных условий в этой ситуации, авторы настоящей статьи решили использовать данные по глобальным изменениям климата, полученные в других райо-

нах Земли. Предполагалось использовать имеющиеся к настоящему времени непрерывные записи из ледяных кернов Гренландии или Антарктиды, бассейновых осадков морей или озер (например, Байкала) и другие, откорректированные по региональным значениям температур пород, полученным при изучении реперных разрезов четвертичных отложений Северной Якутии. Для более корректной реконструкции палеотемператур воздуха и пород необходимо было также принимать во внимание ландшафтные изменения (например, растительности и мощности снежного покрова), наличие или отсутствие широтной зональности в распределении температур и т. д. Потребовалось также изучение условий формирования температуры на дне морей и озер.

В качестве непрерывной глобальной записи была выбрана кривая, полученная по ледниковому керну скважины на станции “Восток” в Антарктиде. Она отражает климатические изменения для последних 420 тысяч лет [Лупенков и др., 2000; Petit et al., 1999]. Район станции “Восток” достаточно удален от океана, обладает резко континентальным климатом, на который океанические события не оказывают заметного влияния. В этом отношении динамика климата центра Антарктиды сходна с динамикой климата арктической Якутии. Антарктическая климатическая кривая, по мнению авторов, имеет минимум искажений, связанных с масштабными региональными природными событиями. Это выгодно отличает ее от байкальской кривой, которая отчетливо отражает развитие локального горного оледенения в окружающих озеро горных районах [Карabanов и др., 2001; Фотиев, 2009]. Использование же кривых, полученных по ледниковым кернам Гренландии, непригодно в связи с существенными различиями в ходе климатических изменений в Северной Атлантике и Восточной Арктике.

Для преобразования исходной антарктической кривой в кривую, отражающую абсолютные величины температур в Северной Якутии, А.В. Гавриловым были разработаны приемы составления региональных моделей динамики температуры воздуха и горных пород [Гаврилов, Тумской, 2001; Гаврилов и др., 2001; Гаврилов, 2005; Гаврилов и др., 2006]. В соответствии с ними исходная антарктическая кривая трансформировалась в региональную (рис. 1) с использованием реперных региональных данных. В качестве таковых были взяты палеотемпературные данные, полученные на основе палинологических реконструкций, изотопных данных по подземным льдам, оценкам палеотемпературных условий по гранулометрическому и минералогическому составам отложений (коэффициенту криогенной контрастности), измерениям температур в глубоких скважинах, полигонально-жильным структурам и т. д. После

вынесения на исходный график антарктической кривой реперных региональных реконструированных значений температуры пород кривая трансформировалась таким образом, чтобы ее ход был максимально приближен к реконструированным значениям. В дальнейшем на кривой сглаживались высокочастотные отклонения и она оцифровывалась.

Реконструкция среднегодовой температуры горных пород на территории современного шельфа потребовала сведений о колебаниях уровня морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в среднем и позднем неоплейстоцене и голоцене. В последние десятилетия получены многочисленные подтверждения глобального характера гляциоэвстатических колебаний уровня Мирового океана [Селиванов, 1996]. Это позволило на текущем этапе исследований использовать данные из других регионов Земли, так как сведений о положении уровня моря в Восточной Арктике крайне мало, а их достоверность весьма дискуссионна. Для нас такими данными служили кривая колебаний уровня моря в Карибском море [Fairbanks, 1989] для последних 17 тысяч лет и кривая для района архипелага Барбадос [Chappell et al., 1996] для последних 140 тысяч лет. Для более длительных интервалов времени использовалась кривая уровня моря, реконструированная по изотопным данным на станции “Восток”. Предполагалось, что влияние тектонического фактора на изменения уровня моря было локальным, разнонаправленным и в целом значительно меньшим по сравнению с гляциоэвстатическим. Используемые кривые колебаний уровня моря корректировались для исследуемого района по имеющимся региональным данным [Дегтяренко и др., 1982; Анисимов и др., 2002; Vauch et al., 2001].

Наряду с данными о колебаниях уровня моря были изучены сведения о гидрологическом режиме шельфовых морей Российской Арктики: направлениях течений, температуре и солености морской воды и их изменениях, роли поверхностного стока, об образовании и разрушении морских льдов, в том числе и роли “Великой Сибирской полыньи”. Благодаря этому появилась возможность оценивать температурные условия на дне арктических шельфовых морей на этапе их трансгрессии.

Важно подчеркнуть, что развитие криолитозоны на территории современных приморских низменностей, арктических островов и шельфа имеет длительную историю формирования, начиная с эоплейстоцена [Геокриология..., 1989]. Поэтому для оценки современных мерзлотных условий приобретают особую значимость современные успехи в развитии палеогеографии кайнозоя Якутии. Например, в результате изучения широко развитых в Северной Якутии подземных льдов боль-

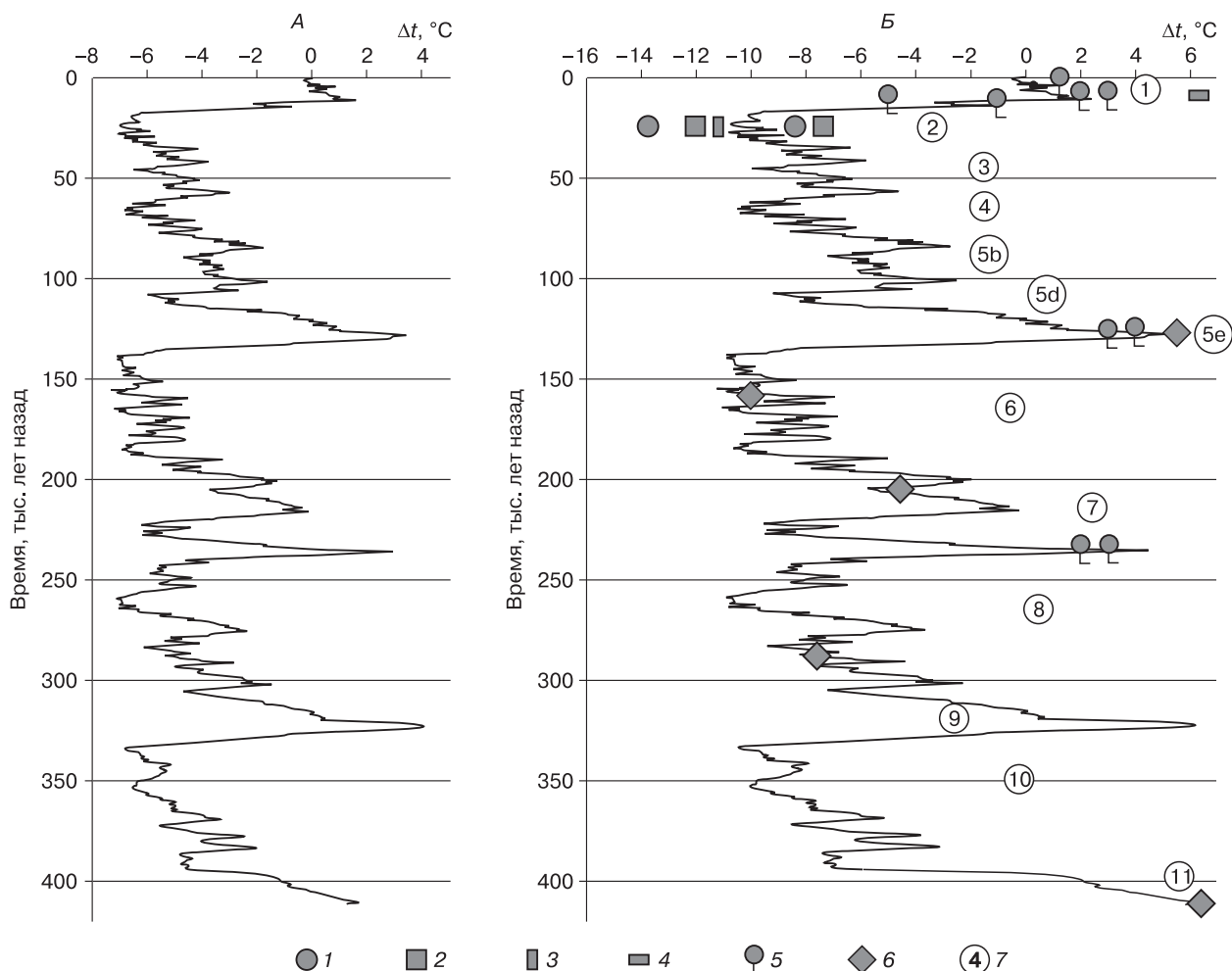


Рис. 1. Схема трансформирования исходной антарктической кривой (А) в региональную (Б) с использованием региональных палеотемпературных реперов (по А.В. Гаврилову [2008]), полученных по:

1 – минералогическим данным; 2 – ширине элементарных ледяных жилков в повторно-жильных льдах; 3 – геотермическим данным в глубоких скважинах; 4 – мощности голоценового “промежуточного слоя”; 5 – мерзлотно-температурным индикаторам; 6 – реконструированы по палинологическим данным; 7 – морские изотопные стадии.

шинством исследователей были приняты предположения об их повторно-жильном происхождении. Таким образом, были отвергнуты представления о существовании покровного наземного оледенения этого региона, распространенные с девятнадцатого века, а гипотеза крупного советского гляциолога М.Г. Гросвальда [Гросвальд, 1988, 1989, 1994] об обширном покровном оледенении всего этого региона не получила подтверждения. В настоящее время считается, что в период последнего крупномасштабного похолодания и гляциоэвстатической регрессии моря на низменностях и осушенной территории шельфа сформировался субаэральный синкриогенный комплекс высокольдистых полифациальных рельефообразующих отложений с повторно-жильными льдами, назван-

ный ледовым комплексом (ЛК), или едомной свитой, с характерной уникальной мамонтовой фауной и многочисленными растительными остатками [Шер, 1971]. Первоначально выделялся один ЛК – среднеплейстоцен(?)–позднеплейстоценовый, однако недавно в результате детальных геолого-криолитологических исследований на о. Бол. Ляховский и на северном побережье материка впервые установлено наличие трех разновозрастных комплексов, знаменующих три этапа похолодания [Тумской, Басилян, 2006, 2009]. Кроме того, геологические исследования показали существование в прошлом локального ледникового щита, занимавшего территорию островов Фаддевский, Новая Сибирь и Де-Лонга, а также прилегающую к ним часть арктического шельфа [Анисци-

мов, Тумской, 2003; Анисимов и др., 2006]. Реконструируемый ледниковый щит имеет существенно меньшие размеры в сравнении с предполагаемым М.Г. Гросвальдом покровным оледенением и более ранний возраст (конец среднего неоплейстоцена). Существование на севере региона покровного оледенения до настоящего времени никем не учитывалось, однако оно, несомненно, влияло на мощность, распространение и эволюцию криолитозоны как на шельфе, так и на территории современных островов.

Для определения геолого-структурного и тектонического строения верхней части разреза шельфа, состава и свойств горных пород и отложений авторами использовались сведения о тектоническом строении региона [Драчев, 1999, 2000; *Drachev et al.*, 2003] и результаты геологических съемок на островах и сопредельной части низменностей [Государственная... карта..., 1999]. Для характеристики высокольдистых отложений ледового комплекса привлекались результаты работ на приморских низменностях Якутии [Труш, Кондратьева, 1975; Конышев, 1981], а также собственные полевые материалы авторов по Яно-Индибирской низменности и Новосибирским островам. Теплофизические свойства пород и отложений были взяты по данным литературных источников и фондовых материалов предшествующих исследований [Теплофизические сведения..., 1984; Гаврильев, 2004].

Особое значение при изучении динамики мощности криолитозоны имеет знание величины теплового потока из недр земли. Авторами для задания нижних граничных условий при моделировании были использованы данные о тепловом потоке из недр по ряду глубоких скважин, пробуренных на островах и низменностях, карты "Тепловой поток Сибири" [Балобаев, 1991], а также немногочисленные сведения, полученные при выполнении российско-германского проекта "Система моря Лаптевых".

Второй этап применения ретроспективного подхода – собственно математическое моделирование мощности криолитозоны и ее динамики в ходе длиннопериодных изменений природной среды. Для учета различных природных факторов (таких как колебания климата и изменения ландшафтов, трансгрессии и регрессии моря и др.) Г.С. Типенко были разработаны оригинальные компьютерные программы. Математическая постановка тепловой задачи подробно рассмотрена в ряде предшествующих работ [Романовский и др., 1999б; Романовский и др., 2009]. Методика исследования влияния различных факторов на мощность криолитозоны строилась на сериях сходных расчетов в точках, в каждой из которых изучалась роль того или иного параметра или комплекса составляющих природной среды: широтного положения, геолого-тектонического строения, состава

и свойств горных пород, величины теплового потока из недр земли, времени затопления или осушения (для шельфа) и т. д. Часть характеристик природной среды задавалась опосредованно. Например, относительно стабильные блоки земной коры при моделировании задавались соответствующим геологическим разрезом и величиной теплового потока в диапазоне от 40 до 70 мВт/м², а присутствие разломных зон и рифтовых структур учитывалось увеличением значений теплового потока до 100–150 мВт/м². Смена субаэральных обстановок осадконакопления морскими условиями отражалась в изменении температуры на верхней границе расчетной области. Для периодов и участков шельфа, когда он был осушен, верхние граничные условия задавались на основании антарктической кривой и ее региональной трансформации в серию кривых среднегодовых температур грунта на суше. Для периодов затопления шельфа принималось, что температура на верхней границе составляет –1,8 °С. Результаты расчетов (мощность шельфовой криолитозоны на определенные временные срезы) наносились на карту в пунктах, для которых были проведены расчеты. Количество пунктов на шельфе, для которых строились такие кривые, определялось масштабом создаваемых схематических карт и особенностями тектонического, геоморфологического и геологического строения территории. При проведении границ мерзлых толщ или криолитозоны разной мощности на схематических картах учитывались контуры тектонических структур с разными величинами теплового потока.

В связи с недостаточной изученностью региона при моделировании динамики мощности шельфовой криолитозоны был принят ряд допущений.

1. Предполагалось, что мерзлотно-температурная зональность, установленная в ходе полевых исследований для настоящего времени, существовала и ранее, как в термохроны, так и в криохроны.

2. Величина теплового потока из недр земли принималась равной аналогичной величине для сходных тектонических структур других районов, так как для шельфа моря Лаптевых таких данных практически нет.

3. При моделировании использовались сильно упрощенные геологические разрезы различных участков шельфа, принятые по результатам интерпретирования сейсмических данных. Свойства горных пород и отложений были осреднены и принимались часто из общих соображений или для сходных отложений из других регионов, поскольку данных о теплофизических характеристиках пород и отложений на восточно-арктическом шельфе нет либо они недоступны.

Третий этап – обработка и интерпретация результатов математического моделирования, пред-

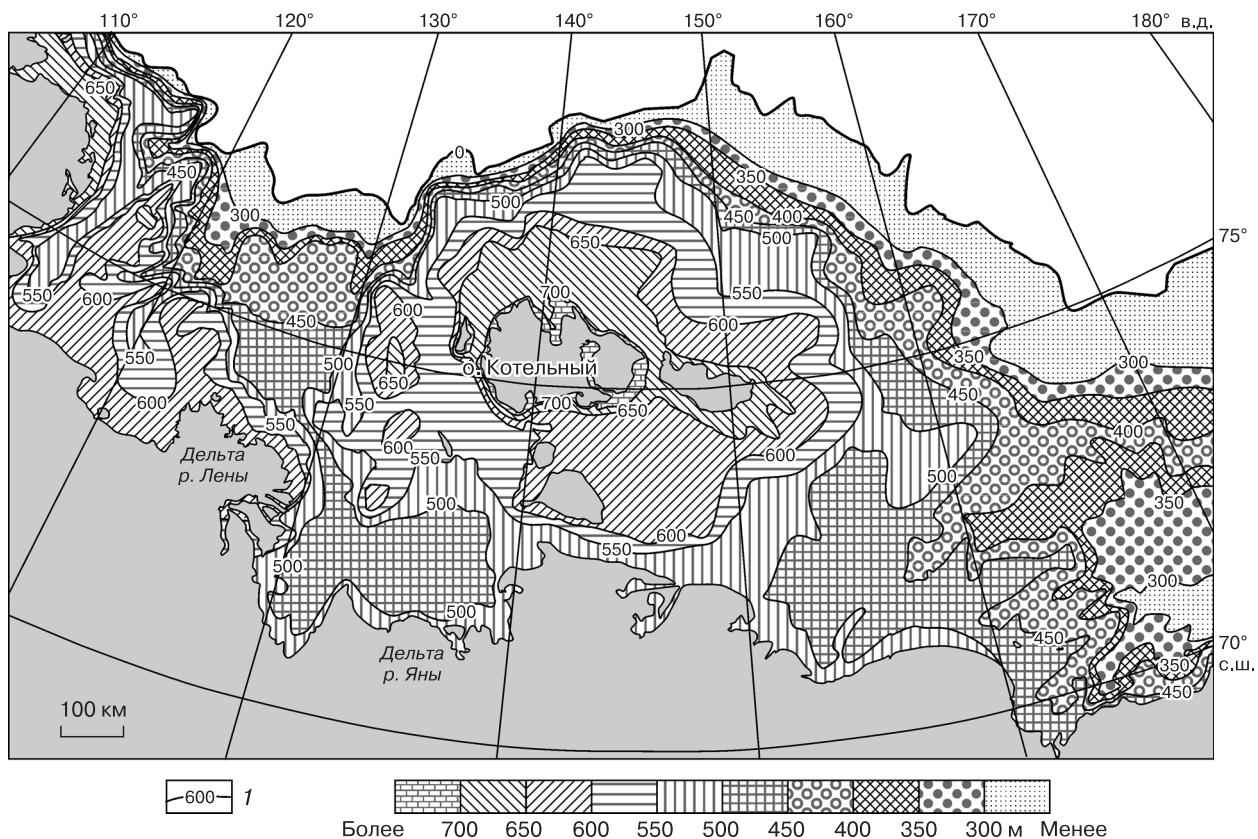


Рис. 2. Схематическая карта мощности криолитозоны на настоящий момент времени (один из вариантов):

1 – мощность криолитозоны, м.

ставляющих собой расчетные температурные поля для дискретных моментов времени. Массивы полученных данных использовались для построения графиков, отражающих изменения мощности криолитозоны во времени в расчетной точке с заданными краевыми условиями. На их основе строились карты распространения и мощности шельфовой криолитозоны моря Лаптевых (рис. 2) и определялось фазовое состояние воды в породах из соотношений температуры начала замерзания поровой влаги и расчетной температуры горных пород. На основе серий расчетов, краевые условия которых отличались лишь по одному параметру, оценивалось влияние различных факторов на мощность криолитозоны. Математическое моделирование, выполнявшееся для участков с известным строением разреза и мощностью криолитозоны (как правило, в пределах суши), позволяло проверить корректность использованных данных и достоверность полученных результатов.

Применение ретроспективного подхода для оценки современных мерзлотных условий шельфовой криолитозоны моря Лаптевых привело в конечном счете к решению двух задач: изучению

мощности криолитозоны и зоны стабильности гидратов газов и исследованию изменений кровли ММП в результате развития озерного термокарста и подоцерных таликов.

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ КРИОЛИТОЗОНЫ И ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ ГАЗОВ И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И ПРИМОРСКИХ НИЗМЕННОСТЯХ

Моделирование мощности криолитозоны и ее многолетней динамики вызвало необходимость решения ряда проблем. Одной из этих проблем, потребовавшей проведения многочисленных вариантов расчетов, стало выяснение влияния задаваемых начальных условий на результат расчетов современной мощности криолитозоны. На первом этапе моделирование осуществлялось для одного климатического столетия цикла, исходя из предположения об отсутствии мерзлоты в начальный момент времени [Романовский и др., 1999б]. В дальнейшем моделирование производилось для четырех циклов. Сопоставление получен-

ных результатов показало, что различие величин современных расчетных мощностей шельфовой криолитозоны в обоих случаях незначительное и не превышает нескольких процентов. Поэтому для оценки современной мощности и распространения субмаринной криолитозоны достаточно проведения расчетов для периода порядка 120–130 тыс. лет. Полученные в ходе расчетов данные позволили составить многочисленные варианты схематических карт распространения и мощности современной шельфовой криолитозоны на территории шельфа моря Лаптевых. Один из вариантов такой карты приведен на рис. 2. Анализ расчетных данных показал, что на этапах регрессий моря, соответствующих гляциоэвстатическим циклам длительностью около 100 тыс. лет, возможна агградация криолитозоны до мощности 600–900 м во внутренней области осушенного шельфа на севере региона в условиях ненарушенных тектонических блоков. На этапах трансгрессий моря сокращение ее мощности происходило преимущественно снизу под влиянием теплового потока из недр земли. Протаивание мерзлых толщ сверху интенсивно происходит только в течение относительно короткого периода, когда они расположены в прибрежной зоне с небольшими глубинами (до 10–15 м) и низкими положительными температурами воды. При дальнейшем увеличении глубины моря среднегодовая температура придонных слоев морской воды и донных отложений повсеместно становится отрицательной и оттаивание мерзлых пород с поверхности прекращается. Деградация многолетнемерзлого состояния пород сверху может при этом происходить только за счет диффузии морских солей и растворения льда и в силу невысокой скорости этого процесса незначительна [Гаврилов, 2008].

Помимо моделирования динамики мощности шельфовой криолитозоны изучалась зона стабильности гидратов газов (ЗСГГ) и ее многолетняя динамика. Считалось, что давление в толще пород шельфа равно гидростатическому. На этапах его осушения давление остается неизменным, а в ходе трансгрессий оно меняется в соответствии с изменениями глубины моря. Давление морской воды, являющееся дополнительным к гидростатическому, передается через сквозные талики, приуроченные к рифтовым структурам, руслам рек и периферии шельфа. При затоплении шельфа морем температурный профиль в мерзлом ярусе криолитозоны становится безградиентным. В нем возникает квазистабильная (метастабильная) часть ЗСГГ, где гидраты газа содержатся внутри ледяных включений. В горизонтах охлажденных пород газы, по-видимому, находятся в свободном или растворенном состоянии. Через сквозные талики, приуроченные к тектоническим нарушениям, происходит эмиссия этих газов. Она образует

многочисленные рассеянные выходы, приводящие к обогащению газами придонного слоя воды, а также сосредоточенные восходящие потоки, называемые факелами. Факелы первоначально были спрогнозированы авторами, а вскоре установлены в шельфовых морях Северной Якутии при полевых гидрологических исследованиях [Шахова и др., 2009; Шахова, 2010].

В ходе работ было также показано, что в настоящее время существуют поднятия нижней поверхности мерзлых пород и ЗСГГ, приуроченные к рифтовым структурам шельфа моря Лаптевых [Романовский и др., 2009]. Они существовали постоянно на этапах как регрессий, так и трансгрессий моря, в течение которых менялись лишь их размеры и местоположение. Во внешней части шельфа на этапах трансгрессии моря было возможно формирование сквозных эндогенных таликов, через которые происходила эмиссия подземных газов. Поднятия подошвы ММП в пределах рифтовых структур, находящихся в областях с высоким нефтегазовым потенциалом, могут быть возможными “криогенными ловушками” газов и их гидратов.

ОЦЕНКА РОЛИ ОЗЕРНОГО ТЕРМОКАРСТА В ПРЕОБРАЗОВАНИИ ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Изучение истории развития региона моря Лаптевых и палеогеографических условий в позднем неоплейстоцене и голоцене привело авторов к разработке новой концепции развития восточно-арктического шельфа в ходе последней послеледниковой морской трансгрессии. При составлении первоначального палеогеографического сценария принималось, что рельеф шельфа существенно не менялся в конце позднего неоплейстоцена и в голоцене [Романовский и др., 1997а,б]. Однако такое предположение не позволяло объяснить многие факты, в том числе скорость последней послеледниковой трансгрессии, во время которой под водой мелководных шельфовых морей Лаптевых и Восточно-Сибирского оказалась за 18–19 тыс. лет огромная территория протяженностью от 300 до 1000 км, расположенная к северу от современной береговой линии. Многочисленные наблюдения российских мерзлотоведов [Арэ, 1980], в том числе последние исследования М.Н. Григорьева [2008], показали, что скорость отступления морских берегов по фронту за счет термоабразии составляет всего 2–8 м в год. Следовательно, за указанный промежуток времени берег не мог продвигаться так далеко на юг только вследствие термоабразии.

Т.Н. Каплиной и А.В. Ложкиным было показано, что массовое развитие озерного термокарста на приморских низменностях Северной Якутии

началось 13–12 тыс. лет назад [Каплина, Ложкин, 1979]. В результате образования термокарстовых озер и их слияния, а затем частичного или полного дренирования, поверхность единой озерно-аллювиальной равнины Северной Якутии была существенно переработана – образовались системы озер, многочисленные аласные котловины и целые аласные долины. Это привело к понижению отметок поверхности равнины на 10–35 м на значительных площадях. Особенно широкое развитие таких термокарстовых депрессий имело место в пределах отрицательных новейших тектонических структур и речных долин, где мощность ЛК была максимальной, а сток из озер затруднен.

Из сопоставления сроков массового развития озерного термокарста и хода послеледниковой трансгрессии авторами был сделан вывод, что трансгрессия моря на значительной части шельфа происходила по уже преобразованной термокарстом поверхности. Морская трансгрессия на начальной стадии, по сути, выражалась в образовании многочисленных ингрессионных заливов, названных термокарстовыми лагунами [Романовский и др., 1999а; Чеверев и др., 2007; Romanovsky et al., 2000]. Таким образом, береговая линия относительно быстро смещалась к югу по системе термокарстовых депрессий, расчлняя озерно-аллювиальную равнину на многочисленные острова и полуострова. Едомные острова-останцы впоследствии постепенно уничтожались термоабразией, так же как это происходит и в настоящее время [Гаврилов и др., 2003]. При этом термоабразия разрушала берега не фронтально, как чаще всего наблюдается сейчас, а уничтожая с разных сторон многочисленные острова и мысы. Это увеличивало не столько скорость термоабразии, сколько масштабы ее проявления. Существенно, что к моменту затопления термокарстовых озер под многими из них были сформированы талики, которые нарушили сплошность ММП и впоследствии перешли в субмаринное состояние [Романовский и др., 1999а; Тумской, 2002; Касымская, 2010].

С помощью математического моделирования были рассчитаны возможные размеры подоцерных таликов и определены условия образования сквозных и несквозных таликов. Детально моделировалось протаивание отложений ЛК на разных широтах с учетом мерзлотно-температурной зональности, динамики самих термокарстовых озер и т. д. [Тумской и др., 2001а], формирование подоцерных таликов и их эволюция на шельфе в результате затопления морской водой в ходе морской трансгрессии [Тумской и др., 2001б; Касымская, 2010]. Были выяснены возможности существования сквозных таликов на шельфе, что обусловлено не только высокими величинами тепловых потоков из недр земли, но и прямым воздействием термо-

карстовых озер. Впервые было показано [Тумской, 2002], что подавляющее количество подоцерных таликов, сформированных под термокарстовыми озерами и перешедших в ходе морской трансгрессии в реликтовое состояние, являются несквозными. Даже в самых благоприятных условиях мощность подоцерных таликов не достигала 150 м при мощности криолитозоны от 300–400 м и более. Отсюда сделан вывод, что рельеф кровли мерзлых толщ на шельфе предопределен особенностями развития шельфа до начала трансгрессии, а реликтовые подоцерные талики и термокарстовые котловины могут быть обнаружены на шельфе. Это предположение подтверждается результатами малоглубинного сейсмоакустического профилирования, проведенного в конце 90-х гг. прошлого века в рамках совместных российско-германских экспедиций [Рекант и др., 2009; Niessen et al., 1999]. На многочисленных профилях зафиксировано большое количество котловин округлой формы, заполненных слоистыми осадками, которые в настоящее время могут интерпретироваться только как реликтовые термокарстовые котловины [Касымская, 2010].

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ РЕТРОСПЕКТИВНОГО ПОДХОДА

Применение ретроспективного подхода для оценки современного состояния криолитозоны в Восточной Арктике, а также для изучения динамики ее мощности показало, что у этого подхода большое будущее и много направлений дальнейшего усовершенствования. По сути метод ретроспективного прогноза является универсальным средством исследования таких объектов, о которых мы имеем мало информации, но при этом представляем, хотя бы в первом приближении, по каким законам они формируются и развиваются. Ретроспективный подход для изучения криолитозоны подразумевает проведение комплексных натурных мерзлотно-геологических и палеогеографических исследований в сочетании с математическим моделированием.

Для восточно-сибирского сектора Арктики в дальнейшем, возможно, более целесообразным будет использование климатических кривых, полученных по осадкам оз. Эльгыгытгын на Чукотке. Однако в настоящее время подробной климатической летописи из этого района не существует. Новейшие мерзлотно-геологические и палеогеографические данные, полученные в последние годы, позволяют уточнять эволюцию природной среды Восточной Арктики. Первоначально авторами полностью отвергалось наличие покровного оледенения на северо-востоке Евразии. Теперь правильнее говорить о формировании в прошлые криохроны как отложений субаэральных син-

криогенных ледовых комплексов, так и локальных ледниковых покровов. Максимального развития эти криосферные явления достигали в разное время и в различных районах Северной Якутии. Использование новых полевых данных позволит уточнить палеогеографическую модель развития региона моря Лаптевых и будет способствовать повышению достоверности результатов математического моделирования динамики мощности криолитозоны. В связи с этим становится очевидной необходимость дальнейших геологических и палеогеографических исследований региона. После разработки палеогеографической модели севера Западной Сибири применение ретроспективного подхода позволит оценить мощность и состояние криолитозоны на шельфе морей Карского и Баренцева. Это тем более необходимо, что для данного региона возможна верификация расчетных результатов в силу значительно большего объема фактических данных о криолитозоне шельфа Западной Арктики.

В плане математического моделирования наиболее важным и перспективным направлением является разработка математической модели динамики субмаринной криолитозоны с учетом массопереноса солей. Ее решение позволит значительно более обоснованно подойти к решению вопроса о состоянии пород субмаринной криолитозоны.

ВЫВОДЫ

Ретроспективный подход при изучении современного состояния и эволюции мощности шельфовой криолитозоны является развитием и расширением метода мерзлотного прогноза. В настоящее время это единственная методика, способная объединять данные из разных областей знаний и получать при этом новые фундаментальные научные результаты. Она применима в разных регионах, как на шельфе, так и на суше. Выделены основные этапы ее применения: создание палеогеографической модели, математическое моделирование, интерпретация результатов, сопоставление их с натурными данными и планирование дальнейших исследований.

Использование ретроспективного подхода для изучения криолитозоны шельфа моря Лаптевых позволило получить новые (не известные ранее) сведения о возможном ее современном состоянии и развить принципиально новые представления об эволюции этого арктического региона:

– для шельфа моря Лаптевых с помощью ретроспективного подхода коллективом исследователей кафедры геокриологии МГУ была показана возможность существования реликтовой шельфовой криолитозоны мощностью до 600–900 м, имеющей сложное многоярусное строение;

– мощности криолитозоны изменялись преимущественно за счет промерзания сверху на этапах регрессий и протаивания снизу под влиянием теплого потока из недр земли на этапах трансгрессий;

– температурный профиль современной шельфовой криолитозоны в большинстве случаев, за исключением участков на мелководьях, является безградиентным;

– кровля реликтовых мерзлых толщ на шельфе расчленена субмаринными таликами мощностью не более 150 м, образовавшимися в результате широкого развития озерного термокарста на этапах перехода от регрессий к трансгрессиям моря и трансформации в субмаринном состоянии;

– существование сквозных таликов на шельфе моря Лаптевых возможно в зонах тектонических нарушений с высокими величинами теплового потока из недр земли и вблизи таких зон при условии развития таликов под существовавшими термокарстовыми озерами;

– особенности льдосодержания, распределения температур и давления в толще отложений шельфовой криолитозоны предполагают присутствие в отложениях гидратов газов, находящихся как в устойчивом, так и в метастабильном состояниях;

– по таликам различного происхождения осуществляется эмиссия газов в воды арктических морей, в том числе за счет разложения гидратов газов.

Авторы благодарны за прочтение текста и конструктивную критику С.М. Фотиеву, А.В. Брушкову, О.М. Лисицыной и всем, кто помогал им в работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-05-00594).

Литература

- Анисимов М.А., Тумской В.Е. Пластовые льды острова Новая Сибирь (Новосибирские острова, Россия) // Криосфера Земли как среда жизнеобеспечения: Материалы Междунар. конф. Пушино, 2003, с. 232–233.
- Анисимов М.А., Тумской В.Е., Иванова В.В. Пластовые льды Новосибирских островов как реликт древнего оледенения // Материалы гляциол. исслед., 2006, вып. 101, с. 143–145.
- Анисимов М.А., Тумской В.Е., Саватюгин Л.М. К вопросу об изменениях природных условий Новосибирских островов в позднем плейстоцене и голоцене // Изв. РГО, 2002, т. 134, вып. 5, с. 32–37.
- Арз Ф.Э. Термоабразия морских берегов. М., Наука, 1980, 158 с.
- Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы Севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.
- Баранов И.Я. Геокриологическая карта СССР. М-б 1:5 000 000. М., 1964.

- Гаврилов А.В.** Методика составления региональных моделей динамики температур воздуха и пород // Материалы Третьей конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 3, с. 50–57.
- Гаврилов А.В.** Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене–голоцене): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2008, 48 с.
- Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хубберген Х.-В., Романовский В.Е.** Распространение островов – реликтов ледового комплекса на Восточно-Сибирском арктическом шельфе // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 18–32.
- Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хубберген Х.-В.** Палеогеографический сценарий последледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 39–50.
- Гаврилов А.В., Тумской В.Е.** Эволюция температуры пород приморских низменностей Якутии в среднем и позднем плейстоцене // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 3, с. 3–16.
- Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Романовский Н.Н.** Метод реконструкции температур пород по изотопным палеотемпературным данным // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, т. 3, с. 46–52.
- Гаврильев Р.И.** Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: Справ. пособие. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004, 146 с.
- Геокриология СССР.** Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 515 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации.** М-6 1:1 000 000 (Н.С.). Лист S-53-55 – Новосибирские острова. Объяснит. зап. СПб., ВСЕГЕИ, 1999, 208 с.
- Григорьев М.Н.** Криоморфогенез устьевого области р. Лены. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1993, 176 с.
- Григорьев М.Н.** Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра географ. наук. Якутск, 2008, 40 с.
- Григорьев Н.Ф.** Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии. М., Наука, 1966, 119 с.
- Гросвальд М.Г.** Признаки покровного оледенения Новосибирских островов и окружающего шельфа // Докл. АН СССР, 1988, т. 302, № 3, с. 654–659.
- Гросвальд М.Г.** Покровное оледенение шельфа Восточной Сибири в позднем плейстоцене // Плейстоцен Сибири. Стратиграфия и межрегиональные корреляции. Новосибирск, Наука, 1989, с. 48–57.
- Гросвальд М.Г.** Ледниковые формы рельефа на приморских низменностях северо-восточной Сибири и северной Аляски? // Всерос. совещание по изучению четвертичного периода: Тезисы докл. М., 1994, с. 74.
- Дегтяренко Ю.П., Пуминов А.П., Благовещенский М.Г.** Береговые линии восточно-арктических морей // Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет. М., Наука, 1982, с. 179–185.
- Драчев С.С.** Тектоника рифтовой континентальной окраины Северо-Восточной Евразии в Арктике (моря Лаптевых и Восточно-Сибирское): Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 1999, 40 с.
- Драчев С.С.** Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника, 2000, № 36, с. 43–58.
- Жигарев Л.А.** Океаническая криолитозона. М., Изд-во Моск. ун-та, 1997, 320 с.
- Каплина Т.Н., Ложкин А.В.** Возраст аласных отложений приморской низменности Якутии // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1979, № 2, с. 69–76.
- Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А., Кузьмин М.И. и др.** Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с западно-сибирской стратиграфией // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 1–2, с. 48–63.
- Касымская М.В.** Реликтовый термокарстовый рельеф и талики восточной части шельфа моря Лаптевых: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2010, 25 с.
- Катасонов Е.М., Пудов Г.Г.** Криолитологические исследования в районе Ванькиной губы моря Лаптевых // Мерзлотные исслед., 1972, вып. XII, с. 130–136.
- Конищев В.Н.** Формирование состава дисперсных пород в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1981, 196 с.
- Липенков В.Я., Барков Н.И., Саламатин А.Н.** История климата и оледенения Антарктиды по результатам изучения ледяного ядра со станции Восток // Проблемы Арктики и Антарктики, СПб., Гидрометеиздат, 2000, вып. 72, с. 197–236.
- Молочушкин Е.Н., Гаврильев Р.И.** Строение, фазовый состав и термический режим горных пород, слагающих дно прибрежной зоны моря Лаптевых // Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л., Гидрометеиздат, 1970, с. 503–509.
- Рекант П.В., Тумской В.Е., Гусев Е.А. и др.** Распространение и особенности залегания субаквальной криолитозоны в районе банок Семеновская и Васильевская (море Лаптевых) по данным сейсмоакустического профилирования // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 332–348.
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Пустовойт Г.П. и др.** Распространение субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1997а, т. I, № 3, с. 9–18.
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Холодов А.Л. и др.** Реконструкция палеогеографических условий шельфа моря Лаптевых для позднплейстоцен-голоценового гляциозвстатического цикла // Криосфера Земли, 1997б, т. I, № 2, с. 42–49.
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др.** Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1999а, т. III, № 3, с. 79–91.
- Романовский Н.Н., Холодов А.Л., Гаврилов А.В. и др.** Мощность мерзлых толщ восточной части шельфа моря Лаптевых (результаты моделирования) // Криосфера Земли, 1999б, т. III, № 2, с. 22–32.
- Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В. и др.** Эволюция и современное состояние мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в рифтах шельфа Восточной Арктики // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, с. 292–319.
- Селиванов А.О.** Изменение уровня Мирового океана в плейстоцене–голоцене и развитие морских берегов. М., Ин-т водных проблем РАН, 1996, 268 с.
- Соловьев В.А.** Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1981, с. 28–38.
- Телепнев Е.В.** Субаквальная мерзлая зона прибрежной части острова Большой Ляховский // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1981, с. 44–53.
- Теплофизические свойства горных пород** / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, 204 с.

- Труш Н.И., Кондратьева К.А.** Состав и свойства верхнеплейстоценовых отложений Яно-Индибирской приморской низменности // Вестн. МГУ, 1975, № 5, с. 72–86.
- Тумской В.Е.** Термокарст и его роль в развитии региона моря Лаптевых в позднем плейстоцене и голоцене: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2002, 26 с.
- Тумской В.Е., Басилян А.Э.** Опорный разрез четвертичных отложений острова Большой Ляховский (Новосибирские острова) // Междунар. раб. совещание “Проблема корреляции плейстоценовых событий на Русском Севере – Correlation of Pleistocene Events in the Russian North (COPERN)”: Тезисы докл. СПб., 2006, с. 106–107.
- Тумской В.Е., Басилян А.Э.** Стратиграфия четвертичных отложений берегов пролива Дмитрия Лаптева (Северная Якутия) // Фундаментальные проблемы квартара: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы VI Всерос. совещания. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009, с. 592–593.
- Тумской В.Е., Романовский Н.Н., Типенко Г.С.** Результаты моделирования протаивания отложений ледового комплекса под термокарстовыми озерами на северо-востоке Якутии // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001а, т. 2, с. 300–307.
- Тумской В.Е., Романовский Н.Н., Типенко Г.С.** Формирование таликов под термокарстовыми озерами на северо-востоке Якутии: результаты моделирования // Там же, 2001б, с. 293–300.
- Фартышев А.И.** О динамике криолитозоны побережий пролива Санникова // Геокриологические и гидрогеологические исследования Якутии. Якутск, 1978, с. 25–37.
- Фартышев А.И.** Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. Новосибирск, Наука, 1993, 136 с.
- Фотиев С.М.** Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 279 с.
- Черев В.Г., Видяпин И.Ю., Тумской В.Е.** Состав и свойства отложений термокарстовых лагун Быковского полуострова // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 44–50.
- Шахова Н.Е.** Метан в морях Восточной Арктики: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 2010, 48 с.
- Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П.** О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных измерений // Докл. РАН, 2009, т. 429, № 4, с. 541–544.
- Шер А.В.** Млекопитающие и стратиграфия плейстоцена крайнего северо-востока СССР и Северной Америки. М., Наука, 1971, 310 с.
- Bauch H.F., Muller-Lupp T., Taldenkova E. et al.** Chronology of the Holocene transgression at the Northern Siberia margin // Global and Planet. Change, 2001, vol. 31, p. 125–139.
- Chappell J., Omura A., McCulloch M. et al.** Reconciliation of Late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep-sea oxygen isotope records // Earth and Planet. Lett. (Elsevier), 1996, vol. 141, p. 227–236.
- Drachev S.S., Kaul N., Beliaev V.N.** Eurasia spreading basin to Laptev Shelf transition: structural pattern and heat flow // Geophys. J. Intern., 2003, vol. 152, p. 688–698.
- Fairbanks R.G.** A 17000-year glacial-eustatic sea level: influences of glacial melting rates on Younger Dryas event and deep ocean circulation // Nature, 1989, vol. 342, p. 637–642.
- Niessen F., Gierlich A., Weigelt E., Jokat W.** High-resolution seismic and sediment echosounding investigation of submarine permafrost on the Laptev Sea shelf // Terra Nostra. Fifth Workshop on Russian-German Cooperation: Laptev Sea System 2000: Abstr. S. Petersburg, AARI, 1999, p. 47.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al.** Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature, 1999, vol. 399, p. 429–436.
- Romanovsky N.N., Hubberten H.-W., Gavrilo A.V. et al.** Thermokarst and Land-Ocean Interactions, Laptev Sea Region, Russia // Permafrost and Periglacial Processes, 2000, vol. 11, p. 137–152.

Поступила в редакцию
13 сентября 2010 г.