

## ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О КРИОЛИТОЗОНЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

А.В. Гаврилов<sup>1</sup>, А.И. Фриденберг<sup>2</sup>, А.М. Гончарова<sup>3</sup>,  
В.З. Хилимонюк<sup>1</sup>, Е.И. Пижанкова<sup>1</sup>, А.Г. Росляков<sup>1</sup>, С.Н. Булдович<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>МГУ им М.В. Ломоносова; <sup>2</sup>ПАО "НК "Роснефть"; <sup>3</sup>ООО «Арктический Научный  
Центр», Москва, Россия

Впервые существование многолетнемерзлых пород (ММП) на дне моря Лаптевых было обнаружено Харитоновым Лаптевым в 1739 г. в районе островов Петра у восточного побережья Таймыра. В 1904 г. А.В. Колчак описал ледяное дно, простиравшееся под тонким слоем ила от берега о. Фаддеевский почти на 0,5 км до глубин 0,5 м.

С 1930-50-х гг. мерзлое состояние пород фиксируется в результате исследований с применением бурения в разных частях шельфа. Это бухта Кожевникова (Пономарев, 1937), авандельта р. Лена, береговая зона вдоль северного и южного берегов пролива Дм. Лаптева, Ванькина и Селляхская губы при глубинах моря до 8 м (Н. Григорьев, 1966). В 1960-80-е годы буровые данные о распространении мерзлых донных пород получены в бухте Тикси, у острова Муостах, в Эбеляхской губе, у северной оконечности острова Большой Ляховский (Молочушкин, 1970; 1973; Фартышев, 1993). В Ванькиной губе производится субмаринная мерзлотная съемка с замерами температуры пород в скважинах, определением её связи с температурой придонной воды, мощности слоя годовых колебаний температуры и ее годовых амплитуд, криогенного строения донных пород (Катасонов, Пудов, 1972), выяснением связи промерзания с засоленностью отложений, палеогеографией района и ее ролью в формировании криолитозоны (Жигарев, Плахт, 1974;).

В конце 1970 гг. район Новосибирских островов охватывается мерзлотно-геотермическими и мерзлотно-гидрогеологическими исследованиями. Скважинами глубиной до 140 м выявляются различные типы строения криолитозоны: от монолитно-мерзлого, до слоистого и полностью охлажденного (Соловьев, 1981). В пределах слоистой толщи вскрыты водоносные пески в проливе Дм. Лаптева (в интервале поддонных глубин 20-130 м). Подземные воды опробованного верхнего водоносного пласта (интервал поддонных глубин 43-53 м) являются преимущественно пресными с минерализацией 1,1 г/л (Неизвестнов, 1999). Их происхождение и характер залегания по отношению к мерзлой толще является предметом дискуссий.

С середины 1990-х гг. в рамках совместных немецко-российских междисциплинарных исследований проводится изучение истории развития природной среды Лаптевоморского региона в среднем плейстоцене-голоцене и субмаринной криолитозоны. В 1990-2000 гг. в результате донного опробования (Dehn et al., 1995) и морского бурения (Kassens et al., 2000) получены сотни как талых, так и мерзлых кернов, содержащих кристаллы льда. Во многих случаях погружение пробоотборника ограничивалось твердомерзлыми породами. Указанные данные повторяют и подтверждают результаты отбора донных пород в 1970 г. вибрационным пробоотборником (200 кернов длиной 350 см) в Эбеляхской губе и западной части пролива Дм. Лаптевых (Молочушкин, 1970; Molochushkin, 1978).

В апреле 2005 г. был пройден буровой профиль со льда, состоявший из четырех скважин на море и одной на термоабразионном берегу у м. Мамонтов Клык на Анабаро-Оленекском побережье (М. Григорьев, 2008; Schirmermeister et al. 2008; Winterfeld et al. 2011). Его протяженность составила 11,5 км при глубинах моря до 6 м. Производились сплошной отбор керна, исследование температуры и солености вскрытых пород по глубине. В результате была количественно охарактеризована позднеголоценовая динамика погружения кровли мерзлых пород, переходящих из субаэральных условий в субмаринные. Получены также данные по изменению солености донных пород в процессе этого перехода.

Вышеизложенное свидетельствует о многочисленности данных о существовании мерзлых пород на рассматриваемом шельфе. Однако нет сведений об их мощности. Они особенно важны, поскольку априори должны быть более значительными, чем в других морях Российской Арктики в силу бóльшей суровости климата как сейчас, так и в позднем плейстоцене. Отсутствие указанных сведений усугубляется ненадежностью данных о мощности ММП на Новосибирских островах, которые могли бы быть ориентиром мощности субмаринных мерзлых толщ. По этой причине представления о мощности и строении субмаринной криолитозоны вырабатывались в процессе многочисленных версий математического моделирования промерзания-оттаивания шельфа в связи с его регрессивно-трансгрессивными циклами. Таких версий, начиная с 1969 г., было не менее пятнадцати. Вот некоторые из них: Молочушкин, 1970; Антипина и др., 1978; Соловьев, 1981; Жигарев, 1997; Фартышев, 1993. Полученные этими работами результаты – вплоть до диаметрально противоположных – обусловлены крайней недостаточностью опорных данных, различиями представлений авторов о колебаниях климата и уровня моря.

Большое значение в повышении информативности математического моделирования сыграли более чем 10-летние исследования Н.Н. Романовского с коллегами (1997; 2001; 2003; 2006). Были исследованы роль озерного термокарста в послеледниковом развитии шельфа, построена модель хода позднеплейстоцен-голоценовой трансгрессии моря, учитывающая его геоморфологические последствия, разработаны методика составления региональных палеогеографических сценариев на основе учета глобальных изменений климата, запечатленных в геохимии позднего кайнозоя, изучена динамика ММП и зоны стабильности гидратов газа шельфа моря Лаптевых за последние 400 тыс. лет (Романовский и др., 2003; 2006).

Масштабная эмиссия метана со дна морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, зафиксированная в 2000 – 2010 гг. (Семилетов, 2007; Шахова, 2010) побудила этих исследователей предположить, что индустриальное потепление, наблюдаемое с начала XX века, ускоряет деградацию субмаринных ММП и что многочисленные метановые сипы индицируют сквозные талики, возникающие в результате этой деградации. Более того, они предполагают, что деградация мерзлых пород дестабилизирует зону газогидратов и метан может поступать именно оттуда.

Для подтверждения этих гипотез была произведена оценка роли высокой температуры придонной воды в деградации субмаринных ММП. Моделировалось образование таликов в случае задания в голоцене средней температуры придонной воды, зафиксированной в море Лаптевых за периоды 1920-2007 и 1999-2009 гг. (Nicolisky et al., 2012). В первый из этих периодов среднегодовая температура на глубинах от 0 до 10 м составляла примерно от 0 до -0,5, во второй – от +0,2 до 0°C (Dmitrenko et al., 2011). Моделирование показало формирование в настоящее время таликов более широкое во втором случае. Однако само исследование (Dmitrenko et al., 2011) показывает, что изменение глубины залегания кровли ММП отстает от изменения температуры поверхности. И только после 25-летнего потепления (с 1985 по 2009 гг.) верхняя граница мерзлой толщи углубляется на 1 м. Таким образом, наблюдаемое повышение температуры не приводит к быстрому оттаиванию мерзлоты и дестабилизации зоны метангидратов.

Вместе с тем следует отметить, что в ряде случаев обнаруживаемые в прибрежных частях сипы метана, могут быть связаны с разгрузкой подземных вод. Так, в пределах Хатангского криоартезианского бассейна зафиксирована обширная таликовая зона в пределах Хатангского залива и бухты Нордвик (Яковлев и др., 2018).

В 2014-2015 гг. в пределах акватории морей Лаптевых проводились сейсмоакустические исследования. В результате интерпретации установлено, что в изучаемом районе, по-видимому, существует сложно построенная слоистая или линзовидно-слоистая структура криолитозоны, в которой чередуются твердомерзлые, пластично-мерзлые и охлажденные отложения. Это чередование предположительно связывается с литологией, степенью минерализации порового флюида, наличием криопэггов, разной льдистостью. На многих участках под палеотермокарстовыми котловинами зафиксированы несквозные талики мощностью до 70-100 м. Они

подтверждают и конкретизируют результаты проведенного ранее моделирования озерного термокарста (Романовский и др., 1999).

### **Выводы**

1. Основные представления о геокриологии шельфа моря Лаптевых вырабатывались по мере поступления прямых и косвенных данных на протяжении всей истории его освоения и исследований.

2. В отсутствии буровых данных за пределами прибрежной полосы представления о мощности и строении субмаринной криолитозоны базировались на результатах анализа многочисленных прибрежных данных в процессе математического моделирования промерзания и протаивания шельфа, происходивших в ходе циклически чередовавшихся регрессий и трансгрессий моря.

3. Познание закономерностей распространения и строения криолитозоны арктического шельфа остро нуждается в разработке геофизических методов исследований. Сейсмоакустические и электроразведочные работы, проведенные в последние годы, позволили заверить и количественно конкретизировать полученные ранее при математическом моделировании сведения о таликах.

### **Литература**

Антипина З.Н., Арз Ф.Э., Молочушкин Е.Н. Расчет деградации многолетнемерзлых пород под дном моря // Геотеплофизические исследования в Сибири. Новосибирск, 1978, с. 66-73.

Григорьев М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири. Автореф. ... дис. д.г.н., Якутск, 2008, 38 с.

Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы Приморской зоны Якутии // М., Наука, 1966, 180 с.

Жигарев Л.А., Плахт И.Р. Особенности строения, распространения и формирования субаквальной криогенной толщи // Проблемы криолитологии, вып. IV, М., Изд-во МГУ, 1974, с. 115-124.

Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М., Изд-во МГУ, 1997, 318 с.

Катасонов Е.М., Пудов Г.Г. Криолитологические исследования в районе Ванькиной губы моря Лаптевых // Мерзлотные исследования, вып XII, М., Изд-во МГУ, 1972, с. 130-136.

Молочушкин Е.Н. Тепловой режим горных пород в юго-восточной части моря Лаптевых. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1970, 24 с.

Молочушкин Е.Н. К мерзлотной характеристике донных пород восточной части Ванькиной губы моря Лаптевых // Вопросы географии Якутии. Вып.6. Л., Гидрометеиздат, 1973, с. 123-129.

Неизвестнов Я.В. Гидрогеология // Объяснительная записка к геологической карте СССР, масштаб 1:1 000 000 (новая серия), лист S-53-55 (Новосибирские острова), Л., ВСЕГЕИ, 1999, с. 139-146.

Пономарев В.М. «Вечная мерзлота» по новейшим данным // Проблемы советской геологии, 1937, т. VII, № 4, с. 27-34.

Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Пустовойт Г.В., Холодов А.Л. и др. Распространение субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли, т. 1, № 3, 1997, с. 9-18

Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Григорьев М.Н., Хуббертен Г.В., Зигерт К. Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, т. III, № 1, 1999, с. 79-91.

Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Холодов А.Л., Типенко Г.С. Состояние толщ многолетнемерзлых пород на шельфе морей восточного сектора Российской Арктики // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 2, с. 3-10.

Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Гаврилов А.В., Елисеева А.А., Типенко Г.С., Холодов А.Л., Романовский В.Е. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов

газов в среднем плейстоцене-голоцене на шельфе восточной части евразийской Арктики // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 51-64.

Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В., Типенко Г.С., Хуббертен Х.В. Многолетняя динамика толщ мерзлых пород и зоны стабильности газовых гидратов в рифтовых структурах Арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 2). Результаты численного моделирования // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 29-38.

Семилетов И.П. Цикл углерода в системе «атмосфера – суша – шельф» в Восточной Арктике (потoki, формы существования, пространственно-временная изменчивость компонентов). Автореф. докт. дисс., М., 2005, 39 с.

Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, изд. ИМ СО АН СССР, 1981, с. 28-38.

Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. Новосибирск: Наука, 1993, 135 с.

Шахова Н.Е. Метан в морях Восточной Арктики Автореф. докт. геол.-мин. н., М., 2010, 46 с.

Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Валясина О.А. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным региональных электроразведочных работ/ Криосфера Земли, 2018, т. XXII, №5, с. 77-95

Dehn J., Kassens H. and TRANSDRIFT II Shipboard Scientific Party. The Sedimentary Environment of the Laptev Sea // Reports on Polar Research, 176, 1995, p. 314-323.

Kassens H., Bauch H., Drachev S. The Transdrift VIII expedition to the Laptev Sea: the shelf Drilling campaign of "Laptev Sea System 2000". Terra Nostra. Sixth Workshop on Russian-German cooperation: Laptev Sea System. Program and Abstracts, S.Peterburg, 2000, p. 39-40.

Molochushkin E.N. The effect of thermal abrasion on the temperature of the permafrost in the coastal zone of the Laptev Sea// Permafrost. Second Intern/ Conf. USSR Contrib. nat. of Sci. Washington D.C., 1978, p. 90-93.

Nicol'sky D.J., Romanovskiy V.E., Romanovskii N.N., Kholodov A. L., Shakhova N.E., Semiletov I. P. Modeling sub-sea permafrost In the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region. Journal of Geophysical Research, vol. 117, F03028. DOI: 10.1029/2012JF0023582012

Schirrmeister L., Grosse G., Kunitsky V., Diana Magens, Meyer H., Dereviagin A., Kuznetsova T., Andreev A., Babiy O., Kienast F., Grigoriev M., Overduin P.P. & Preusser F. Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years // Polar Research 27 2008 249–272

Winterfeld, M., Schirrmeister, L., Grigoriev, M. N., Kunitsky, V. V., Andreev, A., Murray, A. & Overduin, P. P. Coastal permafrost landscape development since the Late Pleistocene in the western Laptev Sea, Siberia // Boreas, 2011, vol.40, 4, p. 697–713.