

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНОЙ МЕРЗЛОТЫ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

*Валентина Владимировна Малахова*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (913)892-70-69, e-mail: malax@sscc.ru

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования эволюции подводной мерзлоты на арктическом шельфе Восточной Сибири для последнего ледникового цикла 120 тыс. лет. По результатам экспериментов современная субаквальная мерзлота распространена от береговой линии до изобаты 120 м и имеет мощность 200–440 м при геотермическом потоке тепла  $60 \text{ мВт/м}^2$ . Сделана оценка влияния процессов солепереноса на динамику оттаивания подводной мерзлоты и скорость опускания ее верхней границы.

**Ключевые слова:** Восточно-Сибирский шельф, криолитозона Арктического шельфа, зона стабильности газогидратов, субаквальная мерзлота, подводная мерзлота.

## MODELING OF CURRENT STATE OF THE SUBSEA PERMAFROST OF THE EAST SIBERIAN SHELF

*Valentina V. Malakhova*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 Pr. Acad. Lavrentieva, Ph. D. of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, tel. (913)892-70-69, e-mail: malax@sscc.ru

We have numerically simulated the subsea permafrost evolution in the East Siberia Arctic shelf for the last glacial cycle, namely, 120 kyr. Submarine permafrost contemporary widespread from the coastline to 120 m isobaths and the thickness of permafrost on the shelf is 200–440 m for the geothermal heat flux  $60 \text{ mW/m}^2$  on the results of experiments. We have estimated the effect of the salt transport on the dynamics of subsea permafrost thawing in this paper.

**Key words:** East Siberian shelf, cryolithozone of the Arctic shelf, methane hydrate stability zone, subsea permafrost, submarine permafrost.

Изучение происхождения, состояния и динамики субаквальных мерзлых пород на шельфе арктических морей представляет большой интерес, особенно в условиях меняющегося климата. Деградация подводной мерзлоты и нарушение условий существования шельфовых газогидратов могут привести к выбросу огромных количеств метана в атмосферу этого региона [1, 2]. Стабильность подводной криолитозоны в условиях изменения климата напрямую зависит от величины изменения температуры и солености воды, температуры воздуха, толщины морского льда. Значимую роль для современного состояния субаквальной мерзлоты играет температура придонного слоя воды, определяющая глубину протаивания. Если температура придонных вод выше  $0^\circ\text{C}$ , реликтовые мерзлые толщи могут протаивать полностью, либо частично.

Данные наблюдений в летний период с 1984 по 2009 год демонстрируют рост температуры придонных вод в морях восточной Арктики до устойчиво положительных значений [3]. Совершенно очевидна необходимость изучения взаимосвязей между субаквальной мерзлотой и термохалинным состоянием вод морей Арктики, чтобы иметь возможность прогнозировать динамику криолитозоны и оценивать масштаб эмиссии парниковых газов, высвобождающихся при ее разрушении.

В настоящей работе представлены результаты математического моделирования динамики толщи субаквальных мерзлых пород Восточно-Сибирского шельфа (ВСШ) с учетом рассчитанной на основе модели Северного Ледовитого океана - Северной Атлантики (СЛО-СА) температуры придонной воды для 1948-2012 гг. [4, 5]. Для расчёта теплопереноса в грунте использовалась модель мерзлоты, разработанная в ИФА РАН [6], адаптированная для случая донных отложений.

Предполагается, что подводная мерзлота Восточно-Сибирского шельфа, сформировалась на суше в холодную эпоху во время отступления моря. Причинами регрессий и трансгрессий Арктического бассейна считают гляциоэвстатические колебания уровня Мирового океана [7-9]. Огромная площадь шельфа с глубинами до 100-120 м в ледниковые периоды была сушей. На ней в результате промерзания под воздействием низкой температуры атмосферы сформировалась мерзлота. В дальнейшем, в ходе последующих трансгрессий океана, примерно 5-13 тысяч лет назад, произошло затопление мерзлых отложений. Для исследования динамики мерзлоты и определения ее мощности используется палеогеографический сценарий, учитывающий изменения уровня океана и формирование мерзлых толщ в субаэральных условиях. Такой длительный период берется, чтобы исключить влияние начальных условий, а также получить картину более длительного этапа динамики мерзлых толщ на шельфе. Более подробное описание используемой модели подводной мерзлоты и детали палеогеографического сценария представлены автором ранее в работе [10, 11].

Пресные грунты шельфа после затопления морем подвергались засолению, и процессы оттаивания донных отложений могут проходить при отрицательной температуре пород. И лишь на некоторой глубине от поверхности дна моря соленость может соответствовать температуре замерзания. Действительно, температура замерзания засоленных отложений или поровых вод ниже 0°C и понижается с возрастанием солености. Поэтому при отрицательных температурах донные отложения из мерзлого состояния могут переходить в охлажденное состояние, образуя горизонты, не содержащие льда. В настоящем исследовании учитывается влияние солености поровых вод на интенсивность разрушения мерзлых пород на шельфе морей восточной Арктики, которое было не учтено в предыдущих расчетах [10, 11].

Результаты численного моделирования показали возможность существования подводной мерзлоты на ВСШ. По результатам экспериментов современная субаквальная мерзлота распространена от береговой линии до изобаты 120 м и имеет мощность 200 - 440 м. В первом эксперименте S0 при моделиро-

вании динамики субаквальной мерзлоты с 1948 по 2012 год не учитывалось влияние солености на температуру замерзания поровых вод. Мерзлота представляет собой монолит несоленых донных отложений с температурой замерзания 0°C. Протаивание мерзлых толщ со стороны морского дна происходит очень медленно, что обусловлено отрицательными температурами придонного слоя воды на шельфе в зимний период. Скорость протаивания мерзлых пород в эксперименте S0 составила порядка 1 см в год для южной части моря Лаптева. При этом скорости деградации верхних горизонтов мерзлоты неодинаковы в разных частях шельфа.

В экспериментах S10 и S30 была проведена оценка влияния солености поровых вод в верхнем 10-30 метровом слое грунта на динамику оттаивания мерзлой толщи. В случае S10 механизм промерзания верхнего 10 м донных отложений зависит от соотношения между соленостью и температурой поровых вод осадков предложенным в [12]. Считается, что с глубиной соленость заметно снижается, и в интервале 0-10 м под дном температура замерзания поровых вод задается с учетом солености, увеличиваясь от -1,8 до 0°C. Скорость деградации мерзлоты и опускания ее верхней границы в эксперименте S10 составила порядка 6,5 см в год для южной части моря Лаптева. Верхняя граница слоя мерзлых отложений на ВСШ опустилась на 0 – 5,5 м от дна моря в зависимости от области шельфа, см. рис.

Результаты бурения донных отложений показали, что морское засоление проникает на глубины более 20 м ниже дна. В случае эксперимента S30 задавалось распределение солености от 32 ‰ до 0 в верхнем 30 метровом слое донных отложений, в соответствии с [13]. Температура замерзания поровых вод определялась с учетом солености (S):  $T_f = -0,054 \cdot S$ .

Скорость деградации мерзлоты составила порядка 7 см в год для южной части моря Лаптева, что незначительно отличается от результатов эксперимента S10. При этом произошло увеличение слоя охлажденных пород до 9 м, см. рис. Результаты моделирования показали, что температурный режим подводной мерзлоты и ее целостность зависят от солености донных отложений. Субаквальная мерзлота в верхнем слое деградирует и при отрицательных температурах донных отложений под воздействием солей в поровых водах.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования состояния подводной мерзлоты на арктическом шельфе Восточной Сибири с учетом изменения температуры придонной воды с 1948 по 2012 год. Проведенные сценарные расчеты показали возможность существования субаквальных мерзлых пород в донных отложениях по всей области ВСШ. Мощность мерзлого слоя под дном зависит от глубины моря и может составить порядка 200-440 м при заданном тепловом потоке 60 мВт/м<sup>2</sup>.

Расчет с учетом климатических изменений до 2012 года показал, что температура придонного слоя морской воды является важным фактором, влияющим на современное состояние субаквальной мерзлоты. Однако, большая интенсивность и глубина протаивания мерзлых донных отложений обусловлена их засолением вследствие миграции солей в поровое пространство после затоп-

ления шельфа. Учет солености имеет существенное значение в темпах деградации верхнего слоя мерзлых пород на шельфе и может быть доминирующим фактором.

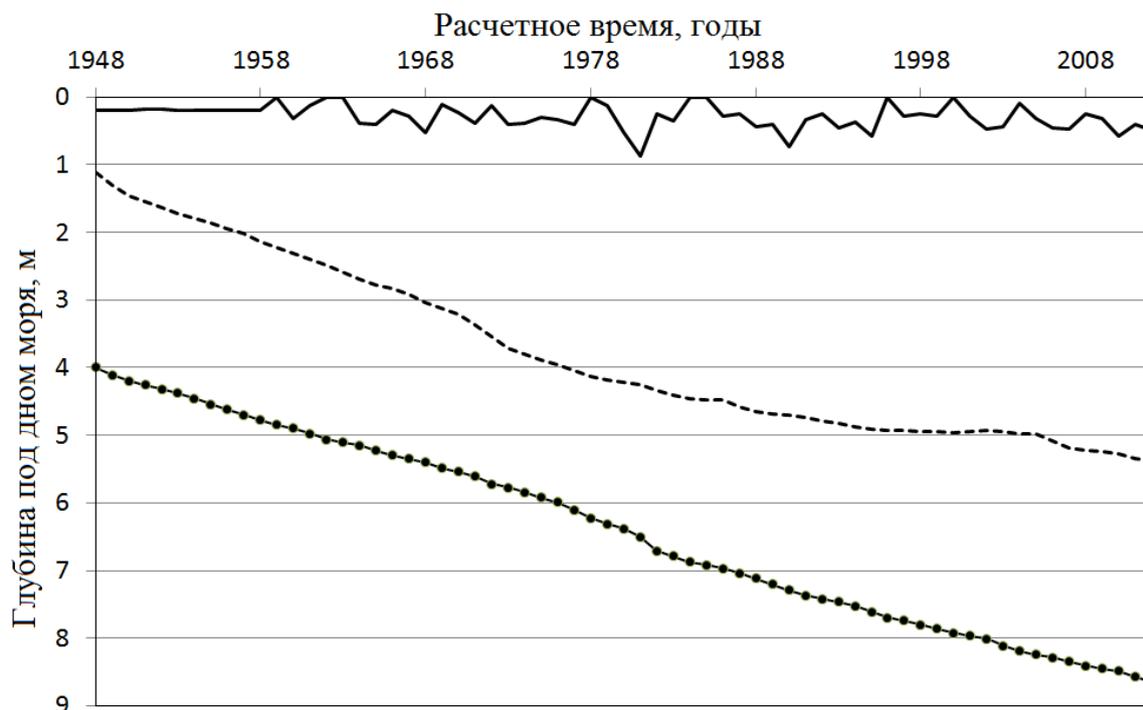


Рис. Результаты моделирования для устьевой зоны р. Лена, изменение положения верхней границы субаквальной мерзлоты с 1948 по 2012 год, в м: сплошная линия – по результатам эксперимента S0, пунктирная линия – S10; маркерованная линия – S30

Проведенные модельные расчеты показали, что современного потепления недостаточно для полной дестабилизации подводной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря. Опускание границы мерзлых осадков к 2012 году составило порядка 0-9 м в зависимости от области шельфа и рассматриваемого сценария. Увеличение глубины протаивания может приводить к усилению процессов метаногенеза в осадочном слое и давать дополнительные потоки метана на дне [1, 2].

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ (№ 14-05-00730 А, № 15-05-02457 А) и Минобрнауки России ПНИЭР RFMEFI61014X0006.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малахова В.В., Голубева Е.Н. О возможной эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Оптика атмосферы и океана. – 2013. Т. 26, № 06. С. 452–458.
2. Shakhova, N., Semiletov, I., Leifer, I., Rekant, P., Salyuk, A., and Kosmach, D.: Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf // J. Geo-phys. Res. 2010. V. 115, C08007, doi:10.1029/2009JC005602.

3. Dmitrenko I., Kirillov S., Tremblay L., Kassens H., Anisimov O., Lavrov S., Razumov S., Grigoriev M. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability // *J. Geophys. Res.* 2011. V.116. C10027, doi:10.1029/2011JC007218.
4. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948 – 2007 гг. // *Известия РАН, серия ФАО.* 2009. Т.45. № 1. С.145 -160.
5. Кузин В.И., Платов Г.А., Голубева Е.Н., Малахова В.В. О некоторых результатах численного моделирования процессов в Северном Ледовитом океане // *Известия РАН. ФАО.* - 2012.- Том 48. - № 1. С.117-136.
6. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2008. Т. 44. № 1. С. 86–93.
7. Romanovskii N. N., Hubberten H.W., Gavrilov A. V., Eliseeva A. A., Tipenko G. S. Off-shore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // *Geo Mar. Lett.* 2005. V. 25. P. 167–182, doi:10.1007/s00367-004-0198-6.
8. Delisle G. Temporal variability of sub-sea permafrost and gas hydrate occurrences as function of climate change in the Laptev Sea, Siberia // *Polarforschung.* 2000. V.68. P.221–225.
9. Nicolsky D.J., Romanovsky 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 // *J. Geophys. Res.* 2012. V.117. F03028, doi:10.1029/2012JF002358.
10. Малахова В. В. Математическое моделирование многолетней динамики подводной мерзлоты Арктического шельфа // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 136–140.*
11. Malakhova V.V., Golubeva E.N. Modeling of the dynamics subsea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf under the past and the future climate changes // *Proceedings of SPIE.* 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 929246. (November 25, 2014) doi: 10.1117/12.2075137
12. Шполянская Н.А. Мерзлотно-экологическая характеристика западного сектора Российского Арктического шельфа // *Известия Коми научного центра УрО РАН. Сыктывкар, 2014. Выпуск 3. №19. С.105-111.*
13. Разумов С.О., Спектор В.Б., Григорьев М.Н. Модель позднекайнозойской эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых // *Океанология.* 2014. Т.54. № 5. С.679-693.

© В. В. Малахова, 2015