НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2006, т. X, № 1, с. 29–38

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ШЕЛЬФЕ И НА ПОБЕРЕЖЬЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

УДК 551.89

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ТОЛЩ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ ГАЗОВ В РИФТОВЫХ СТРУКТУРАХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ (*Сообщение 2*)*

Н. Н. Романовский, А. А. Елисеева, А. В. Гаврилов, Г. С. Типенко[1], Х.-В. Хуббертен[2]

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, 119992, Москва, Ленинские горы, Россия
[1] Институт геоэкологии РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия
[2] Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Д-14473, Потсдам, Телеграфенберг А43, Германия (hubbert@awi-potsdam.de)

Приведены результаты математического моделирования многолетней динамики толщ многолетнемерзлых пород и зоны стабильности гидратов газов в рифтовых грабенах арктического шельфа Восточной Сибири, а также их современного состояния. В двумерной модели рифта учитываются разные свойства отложений в ненарушенных блоках пород, с одной стороны, и в рифтах – с другой, анизотропия свойств в разломных зонах, различия в величинах геотермического потока, свойственные континентальным рифтовым зонам. Установлены некоторые закономерности формирования хорошо выраженных сводообразных поднятий подошвы толщ многолетнемерзлых пород в рифтах. Они могут быть „ловушками" для подземных газов или их гидратов. В субмаринных реликтовых мерзлых толщах выявлены условия образования сквозных эндогенных таликов, а в зоне стабильности гидратов газов – „разрывов", через которые может происходить эмиссия парниковых газов на этапах трансгрессий.

Арктический шельф Восточной Сибири, рифты, толщи многолетнемерзлых пород, зона стабильности гидратов газов, математическое моделирование, палеогеографический сценарий

THE LONG-TERM DYNAMICS OF THE PERMAFROST AND GAS HYDRATE STABILITY ZONE ON RIFTS OF THE EAST SIBERIAN ARCTIC SHELF (*Report 2*)

N. N. Romanovskii, A. A. Eliseeva, A. V. Gavrilov, G. S. Tipenko[1], H.-W. Hubberten[2]

Lomonosov Moscow State University, Department of Geology, 119992, Moscow, Leninskie Gory, Russia
[1] Institute of Environmental Geoscience RAS, 101000, Moscow, Ulansky per., 13, build. 2, Russia
[2] Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research, Telegrafenberg A43, D-14473, Potsdam, Germany (hubbert@awi-potsdam.de)

Results of the mathematical modelling of long-term dynamics of permafrost and gas hydrate stability zone in rift grabens of the Arctic shelf of Eastern Siberia, as well as of their modern conditions are reported. Various properties of sediments in undisturbed blocks of lithosphere, on the one hand, and in rifts, on the other, the anisotropy of thermo-physical properties in rift zones, the distinctions in value of the geothermal heat flux peculiar to continental rift zones are considered in bidimentional mathematical model of rift. Some regularities of formation of sharp raisings of a permafrost lower bound in rifts are established. These raisings can be traps for underground gases or their hydrates. Conditions of formation of open endogenous taliks are revealed in submarine relic permafrost as well as of „breaks" – in gas hydrate stability zone through which the emission of greenhouse gases can occur at stages of transgressions.

East Siberian Arctic sea shelf, rifts, permafrost, gas hydrate stability zone, mathematical modelling, paleogeographic scenario

* В *сообщении 1* (Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 4, с. 42–53) рассмотрены геолого-тектоническая модель и палеогеографический сценарий, использованный при моделировании.

© Н.Н. Романовский, А.А. Елисеева, А.В. Гаврилов, Г.С. Типенко, Х.-В. Хуббертен, 2006

МОДЕЛИ РИФТОВЫХ СТРУКТУР И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД

Модельные расчеты проведены авторами для трех вариантов рифтовых структур, ограниченных ненарушенными блоками пород с типичной для шельфа величиной внутриземного теплового потока $\mathbf{q}_{вз} = 50$ мВт/м^2 (рис. 1):

I – вариант разломной зоны (РЗ) шириной 5 км со значениями $\mathbf{q}_{вз} = 100–150$ мВт/м^2;

II – вариант рифта (или РЗ) шириной 10 км с осредненными повышенными значениями $\mathbf{q}_{вз} = 80–150$ мВт/м^2;

III – вариант узкого разлома (1 км) с $\mathbf{q}_{вз} = 250$ мВт/м^2. Разлом находится в пределах разломной зоны шириной 5 км с величиной $\mathbf{q}_{вз} = 150$ мВт/м^2.

Все варианты модели приняты осесимметричными. Поэтому расчеты с целью повышения их точности проводились для одной половины модели, в то время как вторая часть строилась зеркально относительно первой.

В использованной для расчетов программе впервые учтены следующие природные особенности:

– различие теплофизических свойств пород в ненарушенных блоках и разломах (таблица);

– существование анизотропии теплофизических свойств по разлому в вертикальном и горизонтальном направлениях. Ее учет позволил имитировать наличие конвективных потоков тепла по дислокациям в рифтовых грабенах;

– наличие газовых (газогидратных) залежей внутри РЗ. Моделирование проводилось для случаев расположения залежей в песчаных и супесчаных отложениях. Залежь в песчаных отложениях имеет принятую в модели мощность $m = 200$ м и залегает в интервале глубин $d = 800–1000$ м. Для случая с залежью, расположенной в супесчаных отложениях, рассматривались два варианта: первый – с залежью мощностью 300 м, залегающей на глубинах 300–600 м; второй – с залежью мощностью 600 м, расположенной на глубинах 150–750 м.

Расчеты для каждого сечения рифтовой структуры от 70° до 78° с.ш. проводились для современных глубин моря 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 100 м. Такие сочетания глубин и географических координат обусловлены наличием на шельфе древних долин рек, новейших тектонических поднятий и опусканий, определивших ингрессионный характер послеледниковой трансгрессии моря [*Гаврилов, 2005*], а также мелководий, расположенных далеко от современного побережья. Последние наследуют местоположение островов, слагавшихся ледовым комплексом и разрушенных термоабразией в недавнем прошлом [*Гаврилов и др., 2003*]. Глубина моря обусловливает продолжи-

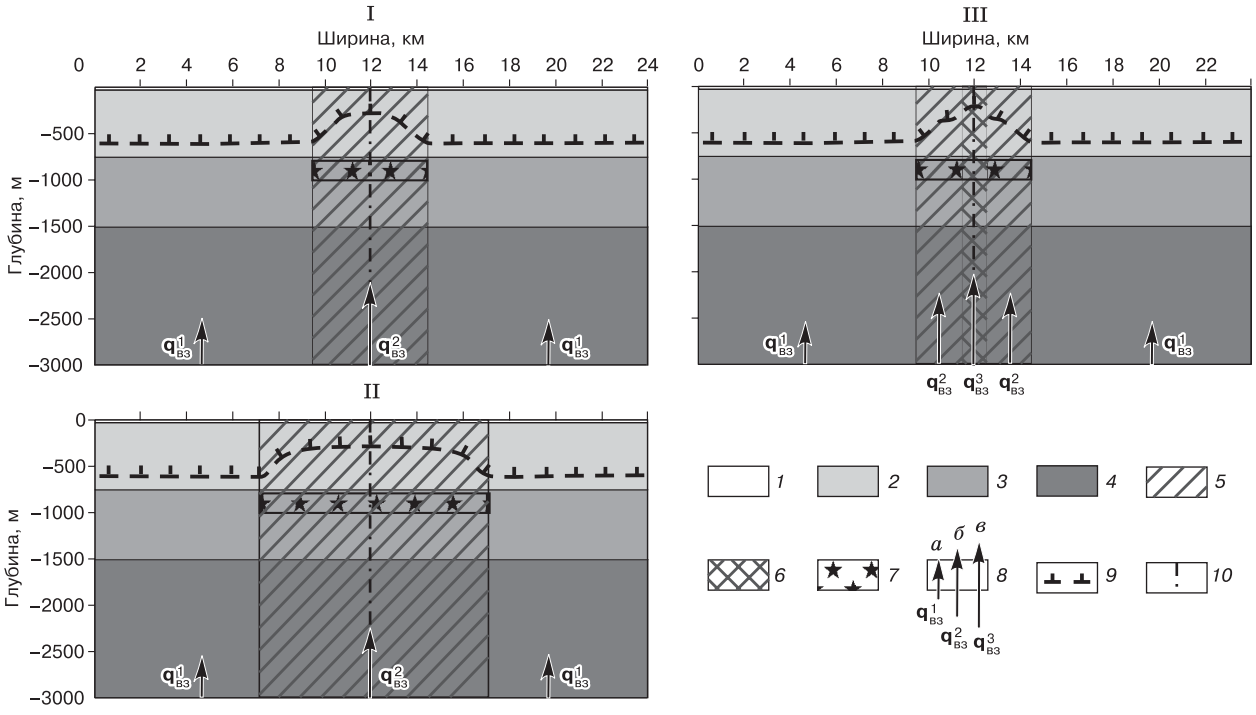

Рис. 1. Схема моделей рифтовых структур, принятых при моделировании:

I, II, III – варианты рифтовых структур; *1* – суглинок тяжелый; *2* – супесь; *3* – песок; *4* – глины, суглинки, пески; *5* – разломная зона; *6* – узкий разлом (1 км); *7* – газосодержащие отложения; *8* – тепловой поток из недр Земли: *а* – в ненарушенном блоке, *б* – в разломной зоне, *в* – в узком разломе; *9* – нижняя поверхность толщ ММП; *10* – ось симметрии.

Состав и свойства отложений, принятые для моделирования ММП и ЗСГГ в рифтовой зоне

Глубина залегания слоев (м)	Наименование пород	Объемный вес скелета грунта ($\gamma_{ск}$, кг/м^3) вне разлома/по разлому	Весовая влажность ($W_в$, %) вне разлома/по разлому	Объемная влажность ($W_о$, %) вне разлома/по разлому	Пористость (n, %) вне разлома/ по разлому	Теплоемкость (Дж/(м^3·К))		Теплопроводность (Вт/(м · К))				Энергия образования (разложения) газогидрата ($Q_{тг} \cdot 10^6$, Дж/м^3)
						талого отложения вне разлома/по разлому ($C_т \cdot 10^6$)	мерзлого отложения вне разлома/по разлому ($C_м \cdot 10^6$)	талого отложения ($\lambda_т$)			мерзлого отложения ($\lambda_м$) вне разлома/ по разлому	
								по горизонтали ($\lambda_{тх}$) вне разлома/по разлому	по вертикали ($\lambda_{ту}$)			
									анизотропия (1) по разлому	*анизотропия (2)* по разлому		
0–10	Суглинок тяжелый	1750/1700	20/35,5	16,6/26	16,6/26	1,75/2,95	1,5/2,25	1,72/1,94	5,82	2,91	2,05/2,38	–
10–750	Супесь	1600/1550	25/38	20/27,5	20/27,5	2,8/3,15	2,08/2,24	1,67/1,82	5,46	2,73	1,98/2,3	–
750–1500	Песок	1600/1550	24/27	19,3/21	19,3/21	2,7/2,85	1,96/2,05	1,85/1,97	5,91	2,96	2,97/3,02	–
1500–3000	Глины, суглинки, пески	1650/1600	23/34,5	18,7/25,6	18,7/25,6	2,5/3,25	1,95/2,3	1,55/1,86	5,58	2,79	1,74/2,1	–
300–600	Газосодержащая супесь	1600/1550	25/38	20/27,5	20/27,5	2,8/3,15	2,08/2,24	1,67/1,82	5,46	2,73	0,59/0,69	132,7
150–700	Газосодержащая супесь	1600/1550	25/38	20/27,5	20/27,5	2,8/3,15	2,08/2,24	1,67/1,82	5,46	2,73	0,59/0,69	132,7
800–1000	Газосодержащий песок	1600/1550	24/27	19,3/21	19,3/21	2,7/2,85	1,96/2,05	1,85/1,97	5,91	2,96	0,89/0,906	101,4

тельность промерзания и аградации мерзлых толщ в периоды регрессий, а также продолжительность затопления и деградации толщ многолетнемерзлых пород (ММП) в периоды трансгрессий. С широтным положением того или иного участка шельфа связана геотемпературная зональность, от которой существенно зависят глубина многолетнего промерзания и температура пород на этапах регрессий и осушения шельфа.

В настоящем исследовании принято вертикальное расположение разломов [*Романовский и др., 2005*], что является упрощением модели, поскольку в реальных рифтах значительная часть разломов расположена наклонно. Указанную особенность планируется учесть в будущем.

Разрез массива пород, для которого проводилось моделирование, выбирался по данным тектонического районирования [*Drachev et al., 1995; Драчев, 1999*]. Авторами был использован условный геологический разрез, представленный рыхлыми кайнозойскими отложениями, характерными для условий отрицательных неотектонических структур. Теплофизические свойства отложений (см. таблицу) были подобраны с использованием опубликованных данных [*Балобаев, 1991; Основы..., 2001; Теплофизические..., 1984*]. При подборе теплофизических характеристик учитывалась совокупность таких свойств, как плотность, влажность и засоленность отложений. Верхняя часть разреза (до глубины 750 м) принималась засоленной. По РЗ задавались повышенные значения пористости и влажности пород, что позволило учесть их нарушенность в разломной зоне.

Инженерно-геологические характеристики отложений, такие как объемный вес скелета грунта, весовая влажность, объемная влажность и пористость выбирались на основании данных, приведенных в [*Грунтоведение, 1983; Инженерная..., 1990; Катасонов, Пудов, 1972; Кошелева, Яшин, 1999*]. Теплофизические свойства отложений взяты из работ [*Балобаев и др., 1983; Теплофизические..., 1984; Балобаев, 1991; Основы..., 2001*], а те же свойства отложений, содержащих газовые гидраты, – из монографии А.Г. Гройсмана [*1985*]. Кривые незамерзшей влаги для мерзлых отложений в условиях изменяющихся температур, использованные при моделировании, заимствованы из работы [*Фазовый..., 1979*].

Известно, что теплоемкость газового гидрата (2,007 Дж/(г·К) при –3 °С) незначительно отличается от теплоемкости льда (2,014 Дж/(г·К) при –3 °С) [*Dvorkin et al., 2000*]. Поэтому теплоемкость отложений, насыщенных газовыми гидратами (ГГ), принималась равной теплоемкости этих отложений в мерзлом состоянии. По данным многих авторов теплопроводность газового гидрата намного меньше, чем теплопроводность льда [*Dvorkin et al., 2000; Истомин, Якушев, 1992*]. При температуре –10 °С коэффициент теплопроводности льда составляет 2,23 Вт/(м·К), а газового гидрата – 0,49 Вт/(м·К). По А.Г. Гройсману [*1985*], при одной и той же влажности коэффициент теплопроводности кварцевого песка, насыщенного газовыми гидратами, примерно на 70 % меньше коэффициента теплопроводности мерзлого песка. Исходя из этого теплопроводность содержащих гидрат отложений в расчетах принималась на 70 % меньше теплопроводности отложений в мерзлом состоянии. Теплоемкость и теплопроводность талых газонасыщенных отложений задавались такими же, как и для талых отложений, насыщенных водой. Это допущение связано с тем, что на данном этапе исследований мы не можем оценить количество газа, содержащегося в растворенном виде и в пузырьках, и его влияние на теплофизические характеристики отложений.

Неоднородность физических свойств отложений в рифтах и разломных зонах обусловливает различные значения теплопроводности талых отложений по вертикальному ($\lambda_{ту}$) и горизонтальному ($\lambda_{тх}$) направлениям. При моделировании значение $\lambda_{тх}$ не менялось и оставалось постоянным. Мы изменяли значение $\lambda_{ту}$ в 3 и 1,5 раза. Первый вариант ($\lambda_{ту}$ увеличена в 3 раза) был предназначен для имитации восходящей фильтрации подземных вод по разлому путем введения эффективной теплопроводности. В таблице этот случай обозначен как *анизотропия (1)*. Второй вариант ($\lambda_{ту}$ изменена в 1,5 раза) имитирует увеличение кондуктивного теплового потока по разлому в вертикальном направлении в полтора раза. В таблице данный вариант обозначен как *анизотропия (2)*. Для газонасыщенных отложений также учитывалась анизотропия теплопроводности талых отложений в разломах по вертикальному направлению.

Величина энергии разложения (образования) газогидрата $Q_{гг}$ ($H_2O + CH_4$) принималась неизменной для всей залежи. Изменения $Q_{гг}$, связанные с возрастанием пластовых температур и давлений с глубиной, в модели не учитывались. Абсолютные значения $Q_{гг}$ варьируют в пределах от 400 до 520–600 кДж/кг при плотности гидрата 0,9 кг/дм^3. В расчетах принято $Q_{гг}$ = 400 кДж/кг. С учетом пористости отложений энергия образования (разложения) в единице объема залежи составляет для супесей $Q_{гг}$ = 132 700 кДж/м^3 (при пористости, равной 0,275) и для песков $Q_{гг}$ = = 101 400 кДж/м^3 (при пористости, равной 0,21).

Теплота фазовых переходов отложений в модели рассчитывается автоматически через кривые незамерзшей воды, поэтому эти значения в таблице не приведены.

Результаты расчетов оформлялись в виде графиков (диаграмм) двух видов. Графики первого вида (например, рис. 2, 3) отражают динамику мощности мерзлых толщ и зоны стабильности гид-

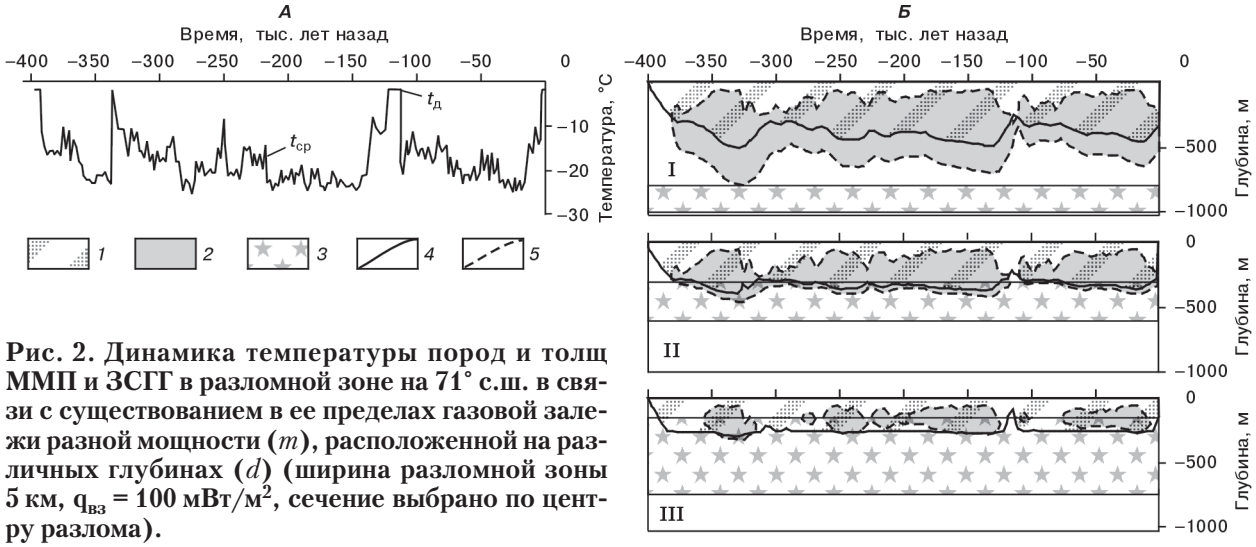

Рис. 2. Динамика температуры пород и толщ ММП и ЗСГГ в разломной зоне на 71° с.ш. в связи с существованием в ее пределах газовой залежи разной мощности (m), расположенной на различных глубинах (d) (ширина разломной зоны 5 км, $q_{вз}$ = 100 мВт/м^2, сечение выбрано по центру разлома).

А – динамика температуры пород ($t_{ср}$ – во время осушения шельфа на современных глубинах 10 м, $t_д$ – во время его затопления); ***Б*** – динамика толщ ММП и ЗСГГ (I – m = 200 м, d = 800–1000 м, в песчаных отложениях; II – m = 300 м, d = 300–600 м, в супесчаных отложениях; III – m = 600 м, d = 150–750 м, в супесчаных отложениях).

1 – ММП, *2* – ЗСГГ, *3* – газовая залежь, *4* – нижняя поверхность толщ ММП, *5* – границы ЗСГГ.

ратов газов (ЗСГГ) в последние 400 тыс. лет на участках современного дна моря (глубина 10 м). Расчеты выполнены для разных участков со свойственными каждому из них глубиной, расположением на определенных широтах и в пределах тех или иных тектонических структур с характерными для них величинами $\mathbf{q}_{вз}$. На графиках второго вида (например, рис. 4; 5,II) представлены результаты моделирования динамики мощности толщ ММП и ЗСГГ на определенный момент времени в пределах рифтового грабена (или разлома) и его ограничений („плеч" рифта, тектонически-ненарушенных блоков пород). Расчеты выполнены в пределах широтно-ориентированных сечений рифта (или РЗ), расположенных на определенных глубинах. При этом простирание рифтовых зон или РЗ принято меридиональным [*Романовский и др., 2005*]. Таким образом, на графиках второго вида демонстрируется конфигурация подошвы толщ ММП, конфигурация верхней и нижней поверхности ЗСГГ, создающиеся в определенный момент времени в связи с различиями значений $\mathbf{q}_{вз}$ и теплофизических свойств пород в РЗ или рифте, с одной стороны, и в ненарушенных блоках пород („плечах" рифта) – с другой, а также в связи с существованием газовой/газогидратной залежи в РЗ.

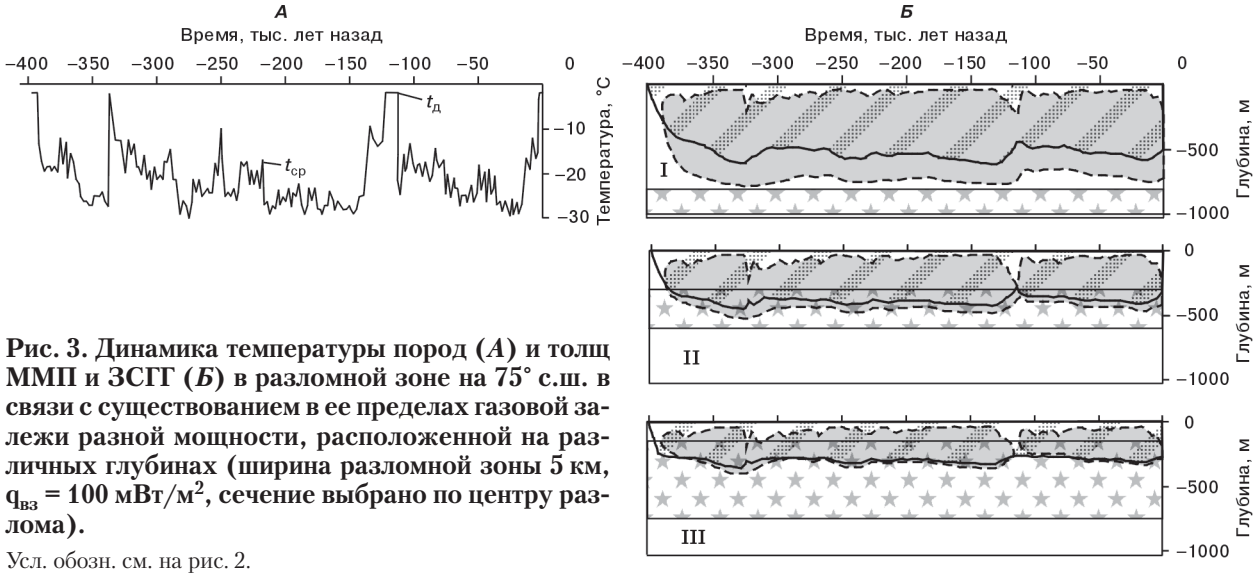

Рис. 3. Динамика температуры пород (*А*) и толщ ММП и ЗСГГ (*Б*) в разломной зоне на 75° с.ш. в связи с существованием в ее пределах газовой залежи разной мощности, расположенной на различных глубинах (ширина разломной зоны 5 км, $q_{вз}$ = 100 мВт/м^2, сечение выбрано по центру разлома).

Усл. обозн. см. на рис. 2.

Сопоставление графиков обоих видов позволяет исследовать многолетнюю динамику толщ ММП и ЗСГГ вне и внутри рифтов, следить за изменением во времени конфигурации границ толщ МПП и ЗСГГ в рифтах (или РЗ), сочленяющихся с ненарушенными блоками пород. Это дает возможность устанавливать периоды и условия образования сводообразной конфигурации подошвы толщ ММП в рифтах (или РЗ), сквозных эндогенных таликов и „разрывов" в ЗСГГ.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛИННОПЕРИОДНОЙ ДИНАМИКИ ТОЛЩ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Многочисленные расчеты, выполненные с использованием вариантов моделей и свойств отложений, приведенных выше, показали следующее. **Различия в величинах $q_{вз}$** в рифтах (или РЗ), с одной стороны, и во вмещающих ненарушенных блоках пород – с другой, приводят к тому, что подошва ММП в рифтах (или РЗ) оказывается более поднятой в центральной их части по сравнению с ее положением в „плечах" рифтов (см. рис. 4–6). Это обусловлено тем, что уменьшение мощности реликтовой субмаринной мерзлой толщи под морем с отрицательной температурой воды происходит в основном за счет ее протаивания снизу [*Романовский, Хуббертен, 2001*]. При этом скорость и суммарная величина сокращения мощности реликтовой толщи ММП, имеющей безградиентное распределение температуры пород, при прочих равных условиях прямо пропорциональны величине $q_{вз}$. Поэтому минимальная глубина промерзания на этапах регрессии и максимальное оттаивание мерзлой толщи при трансгрессиях наблюдаются в центре рифтовых структур, в разломных зонах при $q_{вз}$ = 100–250 мВт/м^2. В прилегающих ненарушенных блоках пород значение $q_{вз}$ для всех вариантов моделирования принято равным 50 мВт/м^2. Такое соотношение величин теплового потока обусловливает существенно меньший диапазон изменений глубин залегания нижней поверхности толщи ММП в ненарушенных блоках в связи с колебаниями климата и уровня моря по сравнению с диапазоном их изменений в разломных зонах рифтов. Указанные особенности таких изменений в рифтах (или РЗ) и ненарушенных блоках определяют меньшую глубину залегания подошвы толщи ММП над разломной зоной по сравнению с ненарушенными блоками.

Степень выраженности сводообразных поднятий в рифтах, т. е. различие в положении подошвы толщи ММП в пределах разломных зон и вне их, судя по результатам моделирования, возрастает при увеличении $q_{вз}$. Так, для РЗ шириной 5 км при $q_{вз}$ = 100 мВт/м^2 различие в мощности толщи ММП вне разломной зоны и внутри ее составляет 300–350 м, а при $q_{вз}$ = 150 мВт/м^2 оно возрастает до 400–450 м (см. рис. 4,***А***,I; 4,***Б***,I). Для рифта шириной 10 км при $q_{вз}$ = 100 мВт/м^2 различие в мощности ММП составляет 350–400 м, а при $q_{вз}$ = 150 мВт/м^2 оно увеличивается до 450–500 м (см. рис. 4,***Б***,III). Эти различия в величинах мощности удается установить в тех случаях, когда над РЗ еще не образовались сквозные эндогенные талики, наблюдаемые на глубинах моря более 60 м. В настоящее время сводообразные поднятия подошвы толщ ММП в рифтах при $q_{вз} \approx 100$ мВт/м^2 и отсутствии анизотропии свойств существуют на всех широтах от побережья до глубин моря 50–60 м. При этом степень их выраженности несколько возрастает в направлении с юга на север, состав-

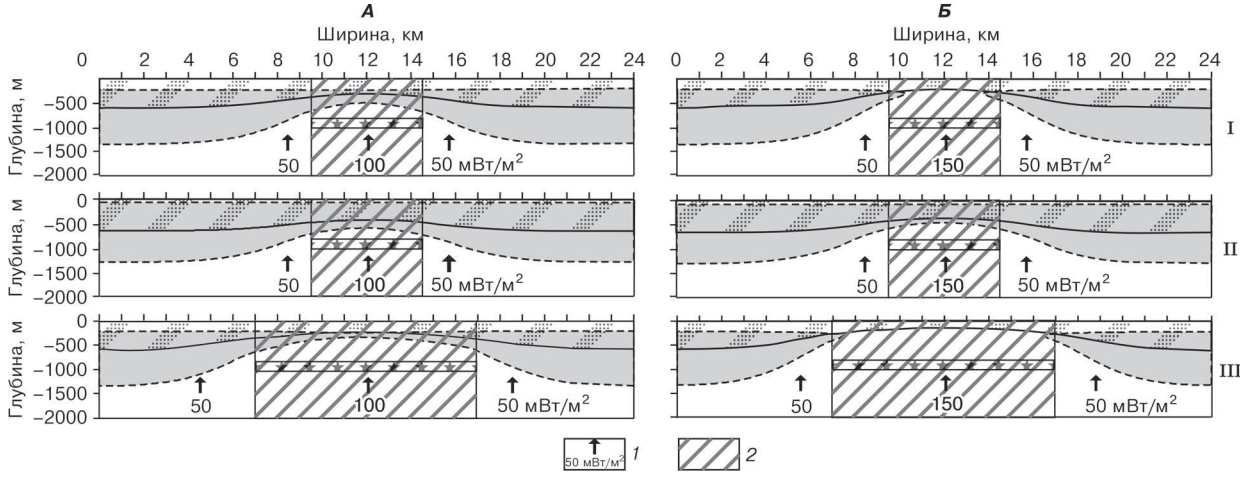

Рис. 4. Положение нижней поверхности толщи ММП и ЗСГГ в оси разломной зоны шириной *l* на 71° с.ш. и на глубине моря 20 м в настоящее время (I, III**) и на время пика сартанского похолодания (**II**).**

А – $q_{вз}$ = 100 мВт/м^2; ***Б*** – $q_{вз}$ = 150 мВт/м^2; I – *l* = 5 км, II – *l* = 5 км, III – *l* = 10 км; *1* – значение теплового потока, *2* – разломная зона. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2.

ляя в диапазоне широт от 71° до 75° с.ш. примерно 10 м мощности на 1 градус широты. Так, в разломной зоне шириной 5 км при глубине моря 10 м мощность ММП составляла 300 м на 71° с.ш. и 350 м на 75° с.ш. (см. рис. 2,***Б***; 3,***Б***).

При возрастании глубины моря увеличивается продолжительность периодов деградации субмаринной мерзлоты на шельфе и ее оттаивания снизу под действием теплового потока из недр Земли. Сквозные эндогенные субмаринные талики при отсутствии существенных различий в теплофизических свойствах в рифте и вне его образуются только во внешней части шельфа, начиная с глубин моря 60–70 м. Так, моделирование динамики ММП при наличии разлома шириной 1 км со значением $\mathbf{q}_{вз}$ = 250 мВт/м^2, находящегося в пределах РЗ рифта шириной 5 км с величиной $\mathbf{q}_{вз}$ = 150 мВт/м^2, показало, что при одинаковых свойствах отложений в блоках и дислоцированной структуре сквозной талик в настоящее время существует только на глубине моря 70 м и более.

Сводообразные поднятия подошвы толщи ММП в рифтах при указанных выше значениях $\mathbf{q}_{вз}$, глубинах моря и широтах выражены весьма хорошо в силу того, что мощность тощи ММП в рифтах в настоящее время невелика и составляет 100–200 м (см. рис. 4–6).

Изучение влияния **ширины рифтов (или РЗ)** на динамику мощности толщи ММП было проведено при одинаковых величинах $\mathbf{q}_{вз}$ и свойствах отложений, а также при наличии газовой залежи, расположенной в песчаных отложениях в диапазоне глубин 800–1000 м. В данном случае газовая залежь находится ниже подошвы ЗСГГ и ММП на протяжении всего расчетного периода, что определяет в ней отсутствие фазовых превращений при

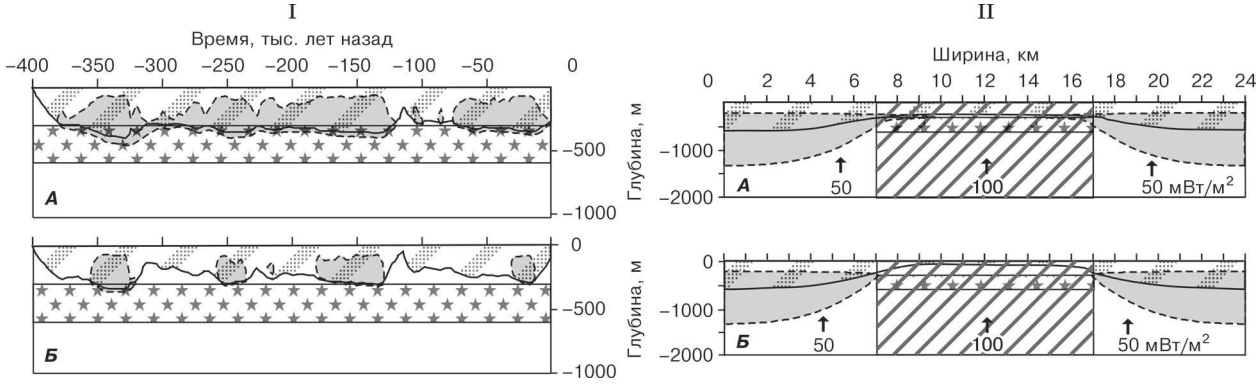

Рис. 5. Влияние анизотропии теплофизических свойств пород на динамику толщ ММП и ЗСГГ на 71° с.ш. и на глубине моря 10 м.

А – без анизотропии, ***Б*** – с анизотропией ($\lambda_{ту}$ в разломе по вертикали в 1,5 раза больше, чем по горизонтали); I – в сечении по центру разлома за последние 400 тыс. лет, II – в разломной зоне и окружающих ее ненарушенных блоках литосферы в настоящее время. Мощность газовой залежи 300 м, ширина РЗ 10 км, $\mathbf{q}_{вз}$ = 100 мВт/м^2. Усл. обозн. см. на рис. 2, 4.

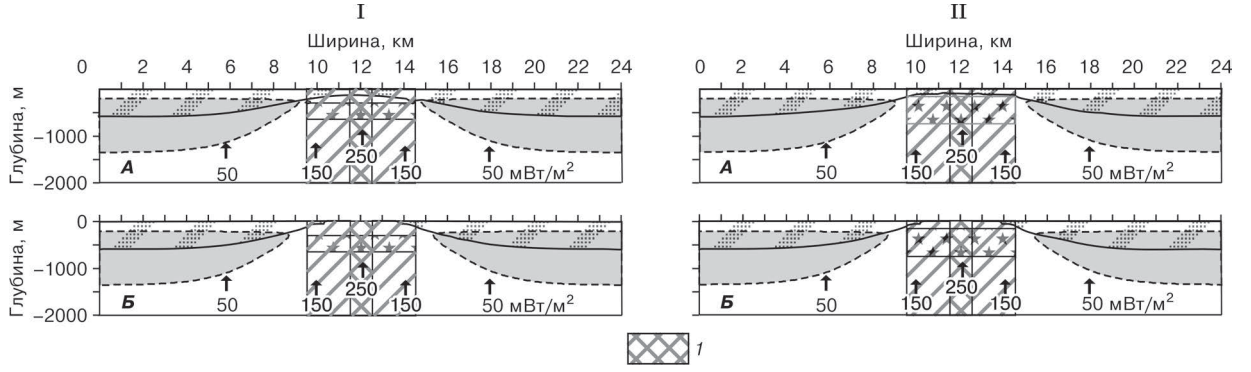

Рис. 6. Распространение и мощность толщи ММП и ЗСГГ в настоящее время в сложно построенной разломной зоне, вмещающей газовую залежь разной мощности (*m*) на различных глубинах (*d*) в супесях, на 71° с.ш. и на глубине моря 10 м для случаев с анизотропией теплофизических свойств пород и без нее.

А – без анизотропии, ***Б*** – с анизотропией ($\lambda_{ту}$ в разломе по вертикали в 1,5 раза больше, чем по горизонтали); I – *m* = 300 м, *d* = 300–600 м; II – *m* = 600 м, *d* = 150–750 м; *1* – разлом шириной 1 км. Разломная зона шириной 5 км с $\mathbf{q}_{вз}$ = 150 мВт/м^2 вмещает разлом шириной 1 км с $\mathbf{q}_{вз}$ = 250 мВт/м^2. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2, 4.

изменении природных условий на поверхности. Это свидетельствует об отсутствии влияния газовой/гидратной залежи на многолетнюю динамику ММП и ЗСГГ. Моделирование показало, что с увеличением ширины РЗ мощность ММП над ними сокращается. Так, сокращение мощности ММП в РЗ шириной 10 км по сравнению с РЗ в 5 км на одних и тех же глубинах и широтах составляет 50–70 м (см. рис. 4,***А***,I,III или рис. 4,***Б***,I,III). По-видимому, это явление можно объяснить ослаблением бокового влияния холодных ненарушенных блоков на положительную тепловую аномалию в рифте, влияющую в свою очередь на глубину многолетнего промерзания.

Рассматривалось также влияние **анизотропии теплофизических свойств пород** по разлому в вертикальном и горизонтальном направлениях на динамику мощности толщи ММП. При изменении $\lambda_{ту}$ в 1,5 раза**,** имитирующем увеличение кондуктивного теплового потока по разлому в вертикальном направлении в полтора раза, выраженность надразломных поднятий подошвы ММП существенно возрастает. Сокращение мощности толщ ММП над РЗ на 71° с.ш. и изобате 10 м по сравнению с вариантом без анизотропии свойств пород составляет 150 м (рис. 5,II,***А***,***Б***). Изменение $\lambda_{ту}$ в 1,5 раза приводит также к более ранней трансформации надразломных поднятий подошвы толщ ММП в сквозные эндогенные субмаринные талики. При $\mathbf{q}_{вз}$ = 100 мВт/м^2 и ширине разломной зоны 5–10 км они начинают формироваться не с 70-метровых глубин (если не учитывать анизотропию), а с 50-метровых. Совместное влияние анизотропии и наличия близповерхностной газовой залежи в РЗ может приводить к образованию сквозных эндогенных таликов на 71° с.ш. и изобате 10 м (рис. 6,I,***Б***; 6,II,***Б***).

В рифтах вследствие имеющихся разрывных нарушений возможно не только существенное изменение теплофизических свойств пород, но и **восходящая фильтрация** по ним напорных подземных вод. Поэтому авторами было проведено моделирование с существенно более высокими значениями теплопроводности пород по разломным зонам, которые можно рассматривать как эффективную теплопроводность. Значения эффективной теплопроводности в разломах, в три раза большие по сравнению с теплопроводностью отложений в ненарушенных блоках, показали возможность существования в настоящее время сквозных эндогенных таликов практически на всей территории арктического шельфа Восточной Сибири в РЗ различной ширины. Возможно, подобный сквозной талик, по которому происходила сильная эмиссия метана, был встречен на южном фланге Бельковско-Святоносского рифта при опробовании содержания углерода в донных осадках и придонных слоях морской воды в осеннее время 2003 и 2004 гг. [*Shakhova et al., 2005*].

В периоды регрессий моря, осушения шельфа и аградации мерзлоты распространение мерзлых пород было повсеместным. Это подтверждается многочисленными результатами модельных расчетов длиннопериодной динамики толщи ММП на шельфе, приведенными на рис. 2, 3 и 4,II. Сквозные эндогенные талики над рифтовыми структурами отсутствовали. Возможным исключением были сквозные талики по разломам в центре рифтов, по которым могла происходить концентрированная разгрузка артезианских напорных вод. Предположить наличие в прошлом таких таликов на шельфе позволяют результаты мерзлотно-гидрогеологических исследований, проведенных в 1970-х гг. на юге арктических приморских низменностей и северных склонах хр. Кулар, где были обнаружены сквозной талик, источник напорных подземных вод „Улахан-Кюегюлюр", и наледь [*Афанасенко и др., 1973*] в весьма суровых мерзлотных условиях.

Из вышеизложенного следует, что конфигурация нижней границы толщ ММП в разломах по результатам моделирования практически повсеместно в рифтовой системе моря Лаптевых имеет сводообразный характер. Его выраженность, как показывают рис. 4–6, возрастает с увеличением разницы в величинах $\mathbf{q}_{вз}$ и теплопроводности пород в РЗ по сравнению с ненарушенными блоками, а также с ростом ширины РЗ. Такие сводообразные структуры, образованные нижней поверхностью толщи ММП, условно можно назвать потенциальными мерзлотными (криогенными) ловушками, учитывая возможность концентрации в них газов и(или) их гидратов, т. е. существования газовых/газогидратных залежей.

Была проведена оценка влияния **залежей газов и их гидратов** на динамику мощностей толщи ММП, связанных с фазовыми превращениями в ЗСГГ. Залежь задавалась в форме пласта, расположенного в рифтовой структуре. При расположении пластовой залежи ниже нижней поверхности зоны стабильности фазовые превращения при изменении природных условий на поверхности не происходят. Влияния такой залежи на динамику мощностей толщи ММП на шельфе не установлено, даже в периоды максимальной мощности ЗСГГ.

Проведено также моделирование для вариантов газовых залежей, расположенных в пределах рифта на глубинах, где существует ЗСГГ. Принималось, что залежи мощностью 300 и 600 м располагались в супесчаной толще в рифтовой зоне шириной 5 и 10 км на 71–75° с.ш. и на глубинах моря 10 и 20 м, а значения $\mathbf{q}_{вз}$ составляли 100 и 150 мВт/м^2. Залежь мощностью 300 м, как указывалось выше, залегает на глубинах 300–600 м. Залежь мощностью 600 м имеет глубины залегания 150–750 м. Во всех случаях толща ММП неизмен-

но в течение четырех гляциоэвстатических и климатических циклов сохраняется в рифтовой зоне (см. рис. 2,***Б***; 3,***Б***), а в залежи происходит образование и диссоциация ГГ. На изобате 10 м и 71° с.ш. гидрат в залежи то образуется, то меняется по мощности, то исчезает полностью (см. рис. 2,***Б***). На изобате 10 м и 75° с.ш. гидрат существует в залежи постоянно при $\mathbf{q}_{вз}$ = 100 мВт/м^2 (см. рис. 3,***Б***), периодически исчезает и образуется вновь при $\mathbf{q}_{вз}$ = 150 мВт/м^2.

Моделирование показало, что чем ближе к поверхности располагается залежь газа, тем меньше мощность ММП (см. рис. 2,***Б***; 3,***Б***). Так, при расположении залежи в супесчаных отложениях на глубинах 300–600 м мощность ММП на 50–200 м меньше, чем в случае залегания залежи в песчаных отложениях на глубинах 800–1000 м (см. рис. 2,***Б***,I,II; 3,***Б***,I,II). Эта разница в мощностях ММП наиболее выражена в холодные этапы времени и имеет широтную зональность. Так, если на 71° с.ш. при современной глубине моря 10 м в холодные этапы времени разница в мощностях ММП составляет 50 м (см. рис. 2,I,II), то на 75° с.ш. при той же глубине она может достигать 200 м (см. рис. 3,***Б***,I,II).

Существование 600-метровой залежи, располагающейся в интервале глубин 150–750 м, приводит к еще более значительному сокращению мощностей ММП и ЗСГГ. Так, при наличии 600-метровой залежи мощность толщи ММП на 100–150 м меньше, чем при 300-метровой (см. рис. 2,***Б***,II,III; 3,***Б***,II,III). Это обусловлено, по-видимому, более значительными величинами затрат тепла при протекании энергоемких фазовых превращений при разложении-образовании ГГ. Подошва мерзлой толщи, находящаяся постоянно в верхней части залежи, изменяет во времени свою глубину залегания весьма незначительно. Это в особой мере относится к варианту с залежью мощностью 600 м, залегающей с глубины 150 м и ниже. Здесь нижняя поверхность мерзлой толщи, попадая в газовую залежь, как бы застревает в ее верхних 100–150 м (см. рис. 2,***Б***,III; 3,***Б***,III). В результате при таком положении залежи мощность ММП в рифтах является наименьшей. При современных глубинах моря 10–20 м мощность толщи ММП в течение всего расчетного периода составляет 200–300 м независимо от широтного положения рифта, ширины разломной зоны и значения $\mathbf{q}_{вз}$. Сокращение мощностей толщ ММП происходит только во время наиболее продолжительных трансгрессий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ ГАЗОВ В РИФТАХ

Исследование зоны стабильности гидратов газов проводилось с использованием моделей, описанных выше. Для расчетов ЗСГГ в настоящей работе были использованы данные по образованию-диссоциации метана в пористой среде, полученные в лаборатории кафедры мерзлотоведения геологического факультета МГУ [*Чувилин и др., 2002*]. Расчеты, отраженные на графиках (см. рис. 2, 3), подтверждают выявленное ранее для арктического шельфа [*Romanovskii et al., 2005*] сходство динамики ЗСГГ и мощности толщ ММП.

Мощность ЗСГГ, подобно мощности толщи ММП, существенно сокращается в пределах рифтов по сравнению с ненарушенными блоками, что обусловлено разницей в величинах $\mathbf{q}_{вз}$ в указанных структурах**.** На нижней поверхности ЗСГГ образуются поднятия, аналогичные сводообразным поднятиям подошвы ММП в рифтах и разломных зонах. Мощность ЗСГГ сокращается значительнее в широких рифтах по сравнению с более узкими. Вне рифтов при $\mathbf{q}_{вз}$ = 50 мВт/м^2 ЗСГГ существует постоянно в течение последних 400 тыс. лет. В рифтах и РЗ шириной 5 и 10 км при $\mathbf{q}_{вз}$ = 100 и 150 мВт/м^2 в ЗСГГ во второй половине периодов трансгрессий в ряде случаев появляются „разрывы" (см. рис. 2,***Б***,II,III; 3,***Б***,III). На этапах осушения шельфа мощность ЗСГГ, как и мощность мерзлой зоны, увеличивается. Вместе с тем при трансгрессиях, когда происходит деградация толщ ММП, ЗСГГ ведет себя иначе. Она не только продолжает существовать, но и в ряде случаев мощность ее увеличивается. Это происходит в связи с возрастанием дополнительного давления, вызываемого столбом морской воды и передаваемого через сквозные талики. Это, пожалуй, более характерно для первой половины и середины периодов трансгрессий, особенно когда температура морской воды отрицательная. В целом различия в динамике мерзлой толщи и ЗСГГ возрастают от прибрежной к внешней части шельфа.

Для ЗСГГ в еще большей степени, чем для мощности толщ ММП, характерно запаздывание ее реакции на динамику климата и развитие трансгрессий. На глубинах моря 50–60 м запаздывание может достигать 20–40 тыс. лет в зависимости от величины $\mathbf{q}_{вз}$. При образовании сквозных эндогенных таликов в рифтовых структурах зона стабильности в них, видимо, продолжает существовать, а при подъеме уровня моря даже увеличиваться. Получено также, что мощность ЗСГГ уменьшается, если мощность газовой залежи возрастает (см. рис. 2,***Б***; 3,***Б***).

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в настоящее время в рифтах и РЗ на арктическом шельфе Восточной Сибири подошва толщи ММП и подошва ЗСГГ сводообразно подняты. Эти поднятия в областях с высоким нефтегазовым потенциалом могут, по-видимому, служить местами концентрации газов и их

гидратов, названными авторами криогенными ловушками. Они существуют постоянно как на этапах регрессии, так и трансгрессии моря. Изменяются только их размеры. В периоды трансгрессий эти структуры приурочены главным образом к внутренней части шельфа. Они лучше выражены в широких рифтовых или разломных зонах, чем в узких. Во внешней части шельфа на этапах трансгрессии моря указанные структуры превращаются в сквозные эндогенные субмаринные талики и „разрывы" в ЗСГГ, через которые (при одновременном их существовании) возможна эмиссия подземных газов.

2. Выявлено, что во многих сквозных эндогенных таликах сохраняется ЗСГГ, что может препятствовать эмиссии газов из подмерзлотных горизонтов.

3. Установлено, что в периоды регрессий моря и аградации мерзлоты на шельфе сквозные эндогенные талики, существовавшие в рифтовых или разломных зонах в конце трансгрессий, промерзают, а возможная эмиссия газов через них, видимо, прекращается. На их месте создаются условия для накопления газов или их гидратов, поскольку подошва формирующихся здесь относительно маломощных толщ ММП в течение всего холодного периода залегает ближе к поверхности, чем в окружающих ненарушенных блоках литосферы. Таким образом, периоды регрессий, по-видимому, являются временем накопления газов ниже толщи ММП на всей территории арктического шельфа Восточной Сибири, а периоды трансгрессий – временем возможной их эмиссии через образующиеся сквозные талики и „разрывы" в ЗСГГ. При этом эмиссия газов происходит преимущественно во внешней части шельфа. Исключение составляют талики, приуроченные к разрывным дислокациям, по которым происходит разгрузка напорных подземных вод, сопровождаемая выходами газов.

4. Выявлено, что залежи газов/газовых гидратов, расположенные в рифтовых зонах, оказывают заметное влияние на устойчивость толщи ММП. Это влияние увеличивается с возрастанием мощности залежи: происходит уменьшение диапазона изменения мощностей и стабилизация положения нижней границы мерзлой толщи.

Авторы благодарны С.М. Фотиеву за инициацию проведения данной работы и ценные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 03-05-64351) и российско-германского проекта „Система моря Лаптевых".

Литература

Афанасенко В.Е., Булдович С.Н., Романовский Н.Н. О проявлении минеральных вод в северной части Кулярского хребта // Бюл. МОИП. Отд. геол., 1973, т. XLVLLL (6), с. 91–102.

Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы Севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 191 с.

Балобаев В.Т., Павлов А.В., Перльштейн Г.З. и др. Теплофизические исследования криолитозоны Сибири. Новосибирск, Наука, 1983, 214 с.

Гаврилов А.В. Роль термокарста в послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых // Материалы Третьей конф. геокриологов России. Т. 3. М., Изд-во МГУ, 2005, с. 50–57.

Гаврилов А.В., Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В., Романовский В.Е. Распространение островов – реликтов ледового комплекса – на Восточно-Сибирском арктическом шельфе // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 18–32.

Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов. Новосибирск, Наука, 1985, 94 с.

Грунтоведение / Под ред. Е.М. Сергеева. М., Изд-во МГУ, 1983, 392 с.

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.

Инженерная геология СССР. Шельфы СССР / Под ред. К.И. Джанджгавы. М., Недра, 1990, 236 с.

Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М., Недра, 1992, 236 с.

Катасонов Е.М., Пудов Г.Г. Криолитологические исследования в районе Ванькиной губы моря Лаптевых // Мерзлотные исслед. М., 1972, вып. 12, с. 38–46.

Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки арктических морей России. СПб., ВНИИОкеангеология, 1999, 286 с.

Основы геокриологии. Ч. 4. Динамическая геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во МГУ, 2001, 688 с.

Романовский Н.Н., Елисеева А.А., Гаврилов А.В. и др. Многолетняя динамика толщ мерзлых пород и зоны стабильности гидратов газов в рифтовых структурах арктического шельфа Восточной Сибири (Сообщение 1) // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 4, с. 42–53.

Романовский Н.Н., Хуббертен Х.-В. Формирование и эволюция криолитозоны шельфа и приморских низменностей (на примере региона моря Лаптевых) // Изв. РАН. Сер. геогр., 2001, № 3, с. 15–28.

Теплофизические свойства горных пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во МГУ, 1984, 204 с.

Фазовый состав влаги в мерзлых породах / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во МГУ, 1979, 189 с.

Чувилин Е.М., Перлова Е.В., Махонина Н.А., Якушев В.С. Фазовые переходы воды в газонасыщенных грунтах // Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 7, с. 685–693.

Drachev S.S., Savostin L.A., Bruni I.E. Structural pattern and tectonic history of the Laptev Sea Region // Rep. on Polar Res., 1995, vol. 176, p. 348–366.

Dvorkin J., Helgerud M.B., Waite W.F. et al. Introduction to physical properties and elasticity models // Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments / M.D. Max (ed.). Netherlands, Kluwer Acad. Publ., 2000, p. 245–260.

Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V. et al. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-Mar. Lett., 2005, vol. 25, p. 167–182.

Shakhova N., Semiletov I., Panteleev G. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: implications for the marine methane cycle // Geophys. Res. Lett., 2005, vol. 32 (9).

Поступила в редакцию
19 сентября 2005 г.