

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.263.551.341

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ И ГАЗОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ**

Н. Н. Романовский, Г. С. Типенко

*Московский государственный университет, геологический ф-т, механико-математический ф-т,
119899 Москва, Воробьевы Горы, Россия*

Над газовыми структурами в области распространения мерзлых толщ существуют положительные и отрицательные аномалии мощности многолетнемерзлых пород и геотемпературные аномалии. В статье приведены результаты математического моделирования взаимодействия мерзлых толщ и газовых/газогидратных залежей, обусловленные климатическими изменениями с периодами колебаний 40 000 и 100 000 лет. Сделан вывод о том, что сопоставимые с природными аномалии могут образовываться под влиянием вторичных газовых залежей, расположенных на небольших глубинах вблизи от подошвы мерзлых толщ, динамика которых обусловлена сорока тысячелетними колебаниями.

Мерзлые толщи, газовые залежи, газовые гидраты, математическое моделирование, климатические изменения, геотермические аномалии

N. N. Romanovskii, G. S. Tipenko

REGULARITIES OF PERMAFROST AND GAS DEPOSITS INTERACTION

*Moscow State University, Department of Geology,
Department of Mekhanic and Mathematic, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia*

Above gas bodies in permafrost area exist positive and negative geothermal anomalies and anomalies of ice bonded permafrost thickness. The paper reports results of mathematical modeling of interaction between permafrost and gas/gas hydrate bodies formed under the influence of climatic fluctuations with periods of 40 000 and 100 000 years. According to the data of modeling, geothermal anomalies similar to those existing in nature may form under the impact of secondary gas bodies, situated at shallow depths near low boundary of permafrost, and due to climate changes with a period of 40 000 years.

Permafrost, gas bodies, gas hydrate, mathematical modeling, climate fluctuation, geothermal anomalies

ВВЕДЕНИЕ

В нефтегазоносных регионах севера Евразии давно отмечалась зависимость положения подошвы мерзлоты от типов локальных структур платформенного чехла [Кудрявцев, 1954]. Над осевыми частями антиклинальных складок мощность многолетнемерзлых пород (ММП) меньше, чем над их крыльями и полого залегающими пластами. Напротив, в центральных частях синклинальных складок мощность ММП обычно больше, чем над их крыльями. Горизонтально залегающие пласты пород не искажали субгоризонтального положения подошвы мерзлой толщи (рис. 1, А). Во многих случаях над анти-

клинальными структурами высоких порядков пластовые температуры на 1—2°C выше, а мощности мерзлых толщ сокращены по сравнению с участками субгоризонтального залегания слоев пород на величину от первых десятков до 100—150 м, что составляет 10—30% от предельных значений мощности. Образование таких аномалий, названных положительными геотемпературными аномалиями, объясняется обычно двумя причинами: во-первых, негоризонтальным залеганием разных по составу и свойствам пород; во-вторых, анизотропией свойств слоистых пород по нормали и параллельно их напластованию.

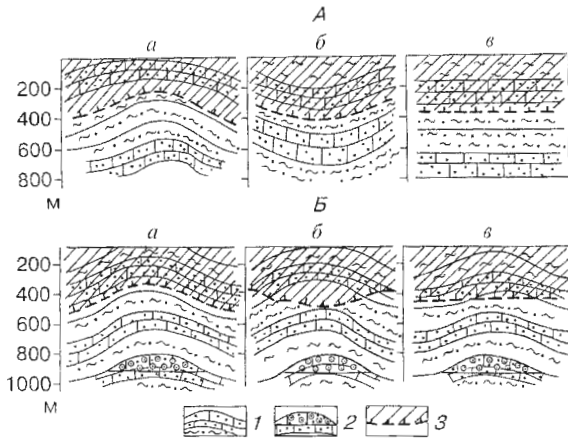


Рис. 1. Типичное положение нижней границы многолетнемерзлых пород в геологических структурах чехла платформ.

А — при отсутствии влияния газовых залежей; Б — при наличии влияния газовых/газогидратных залежей. 1 — слоистость осадочных отложений; 2 — газовая залежь в антиклинальной структуре; 3 — многолетнемерзлые породы и их нижняя граница.

Эти особенности слоистых осадочных пород приводят к перераспределению теплового потока из недр Земли: его увеличению в осевой части структур и уменьшению на крыльях. Результаты изучения мощностей ММП, установленных по скважинам, пробуренным на нефть и газ в конце 50-х — начале 70-х гг., первоначально, казалось, подтверждали эту закономерность. Однако постепенно стали накапливаться факты, не укладывающиеся в приведенную выше схему. Над некоторыми антиклинальными газоносными структурами было обнаружено, что подошва ММП в одних случаях субгоризонтальна, а в других — понижена по сравнению с крыльями структур. В последнем случае существуют отрицательные аномалии мощности ММП (рис. 1, Б).

В антиклинальных складках платформ залежи газа находятся обычно на глубинах 800—1000 м и более. Мощность мерзлых толщ в их осевой части достигает 400—500 м, а на крыльях сокращается на 50—100 м. В этом случае геотермические градиенты и тепловые потоки под осевой частью антиклиналей меньше, а пластовые температуры ниже, чем вне их контуров. Такие аномалии, названные отрицательными геотемпературными аномалиями, известны над газовыми ловушками и вне области распространения многолетнемерзлых толщ пород [Баулин, 1985]. В последнем случае они объясняются наличием восходящих потоков газов, которые расширяются и вследствие адиабатического эффекта охлаждают породы над залежью. Такое объяснение для нефтегазоносных областей плат-

форм со сплошным распространением льдонасыщенных мерзлых пород неправомерно. Дело в том, что ММП являются криогенными водо- и газопорами. Поэтому восходящие потоки газов над первичными газовыми структурами, создают ниже толщ ММП вторичные скопления газов, причины и механизмы формирования которых рассмотрены в работе В.А.Истомина и В.С.Якушева [1990]. Эти исследователи отмечают, что содержание гидратов газов (ГГ) в поровом пространстве вторичных залежей выше, чем в первичных, и достигает 85% от его объема пор. Вторичные скопления газов и их гидратов находятся на небольших глубинах (первые сотни метров), как в пределах современной мерзлой толщи, так и вблизи ее подошвы. Они входят в зону стабильности гидратов газов (ЗСГГ) и, как следствие, взаимодействуют с мерзлыми толщами пород в процессе их динамики под влиянием изменения внешних условий, в первую очередь похолоданий и потеплений климата.

Взаимодействие газовых залежей и толщ многолетнемерзлых пород является относительно новой проблемой в геокриологии [Романовский, 1986; 1988]. Постановка ее связана с появлением представлений о единой причине образования мерзлых толщ и ЗСГГ [Черский и др., 1983], а также о сходстве процессов, происходящих, с одной стороны, при замерзании воды и таянии подземного льда, а с другой — при формировании и разложении ГГ. Сходство этих процессов заключается в выделении/поглощении скрытого тепла льдообразования и скрытой энергии гидратообразования, а также в изменении теплофизических свойств пород. Указанные процессы различаются тем, что фазовые переходы вода ↔ лед практически не зависят от величины внешнего давления (P), а переходы (газ + вода) ↔ ГГ определяются термобарическими условиями [Макагон, 1974; Бык и др., 1980]. Верхняя граница ЗСГГ метана при мощности мерзлой толщи 200—300 м и более находится в пределах последней, а нижняя граница — ниже геоизотермы 0°C, т. е. в подстилающих талых слоях пород.

Динамика верхней части геотемпературного поля субаэральных мерзлых толщ происходит под воздействием периодических изменений температур поверхности Земли [Общая геокриология, 1978]. В результате образуются и деградируют мерзлые толщ и ЗСГГ, меняется положение их границ. В залежах газов, находящихся в интервале глубин, где в процессе динамики геотемпературного поля возникает и исчезает ЗСГГ, происходит образование ↔ разложение ГГ. Это в свою очередь приводит к деформациям температурного поля и изменению конфигурации нижней поверхности ММП. Такое положение, выдвинутое ранее нами [Рома-

новский, 1986], подтверждено результатами тестового моделирования [Тупенко и др., 1990], но закономерности его проявления оставались недостаточно изученными [Романовский, 1993], что и определило цель настоящей работы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является изучение закономерностей взаимодействия мерзлых толщ и газовых (газогидратных) залежей под влиянием длиннопериодных изменений климата, вызывающих динамику температур поверхности Земли, путем математического моделирования. Динамика мерзлых толщ пород и изменения положения ЗСГГ происходят за геологически длительные отрезки времени. В настоящее время можно наблюдать результаты этих процессов. Поэтому изучать указанное взаимодействие во времени возможно только, используя математическое моделирование.

Результаты многочисленных исследований в нефтегазоносных районах Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы, на севере Аляски и Канады свидетельствуют о весьма высокой газонасыщенности верхней части осадочного чехла этих структур, в том числе и в мерзлых толщах пород. В этих регионах при проведении буровых работ и геофизических исследований в скважинах часто встречаются газопроявления, указывающие на скопления газов. Часть этих скоплений, по ряду признаков, достигающих достаточно крупных размеров, находятся в состоянии ГГ. Породы, содержащие ГГ, при стандартном геофизическом опробовании скважин принимаются за многолетнемерзлые породы. Происходит это вследствие сходства физических свойств льдо- и гидратосодержащих пород.

В настоящее время считается, что вторичные скопления газов не имеют промышленного значения. Поэтому они игнорируются при разведке и добыче газа. Вместе с тем в будущем ГГ в толщах пород могут стать нетрадиционным источником углеводородного сырья.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ВЫБОР ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Моделировалась антиклинальная складка, к которой приурочена залежь газа. Такая форма газоносной структуры была выбрана как наиболее характерная для осадочного чехла платформ. Залежь располагалась в диапазоне глубин, где возможно образование ЗСГГ и куда проникают длиннопериодные колебания температур, влияющие на формирование толщ ММП, мощностью 200—600 м. К ним относятся колебания климата с периодами (T) 40 и 100 тыс. лет. В позднем кайнозое именно эти колебания приводили к

крупным похолоданиям и потеплениям, к аградации и деградации мерзлых толщ во внеледниковых областях, в том числе и в нефтегазоносных провинциях северной Евразии. Под влиянием изменений климата с такими периодами на юге этих провинций толщи ММП протаивали полностью, а на севере повышались их температуры и уменьшалась мощность [Общая геокриология, 1978; Баулин, 1985]. Климатические колебания с более короткими периодами, проникают на небольшие глубины (от первых десятков до 100—200 м) и приводят только к динамике температурного поля верхних горизонтов пород, а также к аградации и деградации ММП, мощностью до 100—150 м.

Предварительные расчеты показали, что необходимым условием взаимодействия мерзлых толщ и залежей природного газа является расположение последних в интервале глубин, который периодически входит в ЗСГГ. Этот интервал зависит: от длины периода температурных колебаний (T); от средней температуры поверхности пород (t_0); от амплитуд колебаний температур на поверхности Земли (A_0); от геотермического градиента (g) и от состава газа. Состав газа обуславливает характер равновесной кривой гидратообразования [Макагон, 1974]. Подчеркнем, что изменения t_0 позволяют имитировать при моделировании геокриологическую зональность, а амплитуда колебаний температур — диапазон изменения мерзлотных условий за выбранный период времени.

Изложенные выше представления определили выбор входных данных. Для расчетов были приняты величины: g — от 0,023 до 0,03° С/м, характерные для Западно-Сибирской плиты, Вилуйской синеклизы и других регионов, где существуют ММП и ЗСГГ; t_0 — в диапазоне от -4,4 до -11°С, что отражает современные условия северной геокриологической зоны, где мерзлые толщи имеют плейстоценовый возраст [Фотиев, 1978]. Значения A_0 были выбраны на основании приводимых в палеогеографической литературе оценок диапазонов изменений климата в позднем кайнозое в указанных выше регионах. По соотношению t_0 и A_0 моделировались известные в теории случаи [Общая геокриология, 1978]: мерзлая толща за период колебаний никогда не оттаивает с поверхности при $|t_0| > A_0$; на определенной фазе она оттаивает с поверхности при $|t_0| < A_0$, сохраняясь часть периода в виде реликтовой мерзлой толщи.

Расчеты проводились для двумерного массива пород прямоугольной формы размером $L_x = 800$ м, $L_y = 600$ —1000 м, в котором на разных глубинах располагалась газовая залежь в форме верхней четверти эллипса с полуосью $a_x = 500$ м и полуосью a_y , имеющей переменные значения от 80 до 160 м (таблица). Изменение значений a_y

Входные данные, принятые при моделировании

№ варианта	$t_0, ^\circ\text{C}$	$A_0, ^\circ\text{C}$	$g, ^\circ\text{C}/\text{м}$	$T, \text{тыс. лет.}$	Глубина подошвы залежи, м	Высота залежи по центру, м
А-1	-10	8	0,027	100	700	100
А-2	-10	10	0,027	100	820	260
А-3	-11	13	0,027	100	820	260
Б-1	-4,4	5,8	0,023	40	400	80 ¹
Б-2	-6	10	0,023	40	400	80
Б-2*	-6	6,5	0,023	40	440	160
Б-3	-6	10	0,023	40	400	80 ²
Б-4	-6	5,8	0,023	40	400	80
Б-4*	-6	5,8	0,023	40	440	160
Б-5	-6	5,8	0,03	40	400	80
Б-5*	-6	5,6	0,03	40	440	160
Б-6	-8	5,8	0,03	40	400	80
Б-6*	-8	5,8	0,03	40	440	160
Б-7	-7	5,8	0,03	40	440	160
Б-7*	-7	5,6	0,03	40	400	80
Б-7**	-7	7,6	0,03	40	440	160

* Расчет выполнен при $Q_{\text{гт}}=202720 \text{ кДж}/\text{м}^3$; результаты расчета при тех же параметрах модели, но при $Q_{\text{гт}}=144700 \text{ кДж}/\text{м}^3$ приведены в работе [Типенко и др., 1990]. ** В диапазоне глубин 300—400 м в обрамлении залежи смоделирован слой пород, в котором отсутствуют фазовые переходы воды.

позволило исследовать влияние вертикальных размеров залежи на размеры аномалий мощностей ММП.

Было принято, что массив пород в верхней части промерзает и протаивает под влиянием гармонических колебаний температур с $T = 100\ 000$ и $40\ 000$ лет, при меняющихся значениях t_0 и A_0 . Между мерзлой и талой (немерзлой) областями существует подвижная граница — Γ_1 . При понижении пластовых температур газ в залежи может переходить в состояние ГГ с образованием подвижных границ раздела фаз: верхней — Γ_2 и в некоторых случаях нижней — Γ_2 . Теплоперенос реализуется кондуктивным путем [Типенко и др., 1990]. Модель не учитывает возможные процессы фильтрации воды и газа, механические деформации массива пород, изменения размеров залежи при взаимопереходах (вода + газ) \leftrightarrow ГГ, а также кинематику этих процессов. Последнее полностью оправдано поскольку время взаимопереходов (вода + газ) \leftrightarrow ГГ, (вода в породе) \leftrightarrow подземный лед изменяется в пределах $10e^4 - 10e^5$ сек [Гройсман, 1985]. Это несоизмеримо мало с геологическим масштабом времени. В модели принято, что газ представлен метаном, P в залежи постоянно и равно гидростатическому давлению пресных подземных вод, а температура их фазового перехода на границе ММП и талых пород (фронт Γ_1) равна 0°C .

С учетом перечисленных ограничений процесс образования/разложения ГГ в массиве пород формально описан аналогично процессам промерзания/протаивания водонасыщенных грубодисперсных пород (двухзонная модель). На границах Γ_2 и Γ_2 , {(газ+вода) \leftrightarrow ГГ} происходят процессы фазовых превращений первого рода, подобные переходам вода \leftrightarrow лед. При этом учитывается, что температура образования/разложения ГГ (T) зависит от P . Кривая равновесных условий гидратообразования описана в виде: $T = A \ln P + B$ [Типенко и др., 1990].

Принято, что верхняя часть разреза представлена супесчано-суглинистой толщей отложений, характерной для Западно-Сибирской плиты. Влажность отложений равна полной влагоемкости, что соответствует теплоте фазовых переходов $Q_{\text{ф}} = 97\ 200 \text{ кДж}/\text{м}^3$. Теплофизические характеристики мерзлых и талых (немерзлых) отложений назначались по [Теплофизические свойства..., 1984]. Анизотропия теплофизических свойств отложений по нормали и параллельно напластованию не учитывалась. Теплофизические характеристики пород, насыщенных ГГ и парогазовой смесью, взяты из работы А.Г.Гройсмана [1985]; величины $Q_{\text{гт}}$ — энергии разложения/образования ГГ \leftrightarrow (вода + CH_4) приведены по данным А.Г.Малышева и Г.Н.Тюшняковой [1975]. В расчетах принималась $Q_{\text{гт}}=400 \text{ кДж}/\text{кг}$ и только в одном случае — $Q_{\text{гт}}=560 \text{ кДж}/\text{кг}$ (вариант Б-1). При заданной пористости газовой коллектора, равной 30%, $Q_{\text{гт}}$, в единице объема залежи соответственно равно 144 700 и 202 720 $\text{кДж}/\text{м}^3$.

Математическая модель с учетом изложенных выше предпосылок и ограничений более подробно описана в работе [Типенко и др., 1990]. Численная реализация проводилась с использованием неявной абсолютно устойчивой локально-одномерной разностной схемы с автоматическим выбором шага по времени. В качестве начального распределения температур было принято поле с нулевой температурой на поверхности и линейным изменением ее с глубиной. Счет обычно проводился 3—4 периода до установления устойчивого периодического изменения температурного поля во всей расчетной области. Моделирование проведено для 16 вариантов при входных данных, приведенных в таблице.

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования представлялись и анализировались в форме графических изображений, примеры которых приведены на рис. 2—4. Основными являлись изображения модели с положением подвижных границ Γ_1 и Γ_2 ,

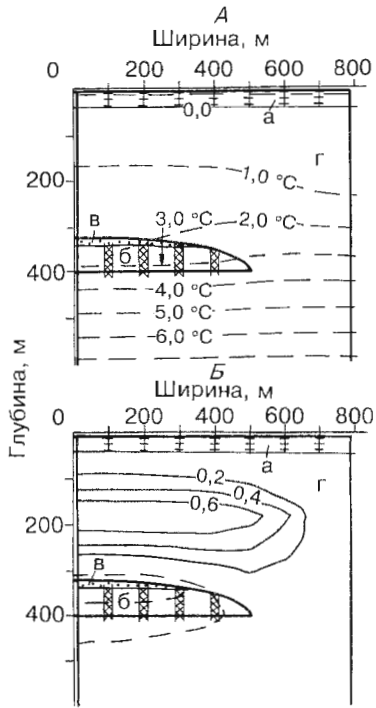


Рис. 2. Примеры графического представления данных, получаемых при моделировании на каждый выбранный момент времени.

А — изотермы температур пород, °С; Б — изолинии равных отклонений температур (°С) в геотемпературных аномалиях. $t_{ср}$ — $-6,0^{\circ}\text{C}$; амплитуда — $10,0^{\circ}\text{C}$; время — 17161,3. а — многолетнемерзлые породы; б — газовые гидраты в залежи; в — газ в залежи; г — немерзлые породы.

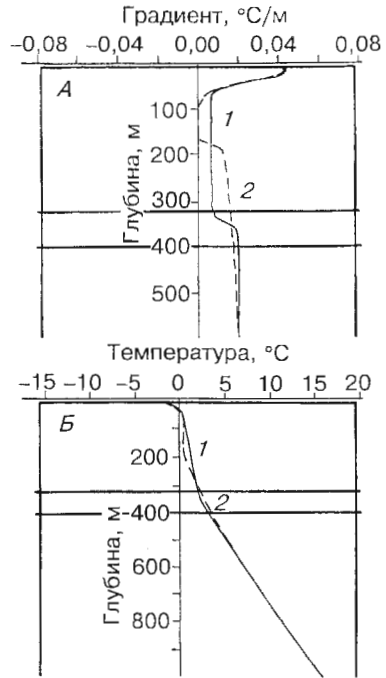


Рис. 3. Примеры кривых распределения: А — градиентов температур ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$); Б — температур пород ($^{\circ}\text{C}$) по центру залежи (1) — сечение 0 м и на границе исследуемой области (2) — сечение 800 м на каждый выбранный момент времени.

$t_{ср}$ — $-6,0^{\circ}\text{C}$; амплитуда — $10,0^{\circ}\text{C}$; время — 17161,3.

Γ_2 , выведившиеся на дисплей через определенные интервалы времени. Изображения на выбранное время строились в двух вариантах: во-первых, с геоизотермами (см. рис. 2, А) и, во-вторых, с изолиниями разности температур в массиве по осям $X = 0$ (центр залежи, нулевое сечение) и $X = 800$ (граница исследуемой области) (см. рис. 2, Б). Во втором варианте производилось сравнение температур по сечениям, где влияние происходящих в залежи процессов на динамику температурного поля наибольшее (сечение 0 по оси залежи) и где оно отсутствует полностью (сечение 800 м). Кроме того, для каждого выбранного момента времени для сечений 0 и 800 м строились кривые распределения температур (см. рис. 3, А) и градиентов температур (см. рис. 3, Б) в массиве. Для каждого рассчитанного варианта задачи был построен график динамики границ во времени по тем же сечениям (см. рис. 4).

Последовательное сопоставление полученных изображений позволило оценить динамику температурных полей, подвижных границ мерз-

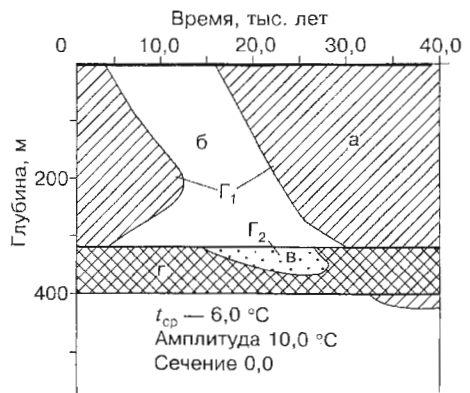


Рис. 4. Пример графического изображения движения фронтов во времени в осевой части залежи.

Фронт Γ_1 между многолетнемерзлыми (а) и тальми (б) породами; фронт Γ_2 между газосодержащими (в) и газогидратсодержащими (г) породами.

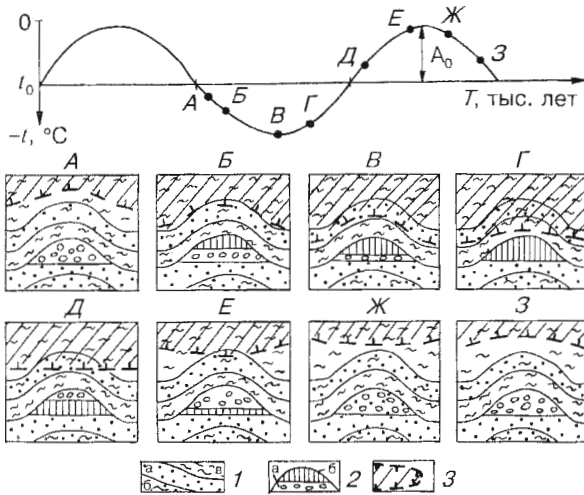


Рис. 5. Обобщенная схема взаимодействия мерзлой толщи и газовой/газогидратной залежи для случая, когда подошва толщи ММП никогда не достигает залежи ($-t_0 > A_0$, $T = 40$ тыс. лет.).

На кривой изменения температуры поверхности земли буквами обозначены моменты времени, для которых приведены рисунки с соотношениями толщи ММП, газов и ГГ в залежи. 1 — слоистые породы суглинистого (а), песчаного (б) и супесчаного (в) составов; 2 — залежь с газом (а) и гидратом газа (б); 3 — многолетнемерзлые породы и их границы.

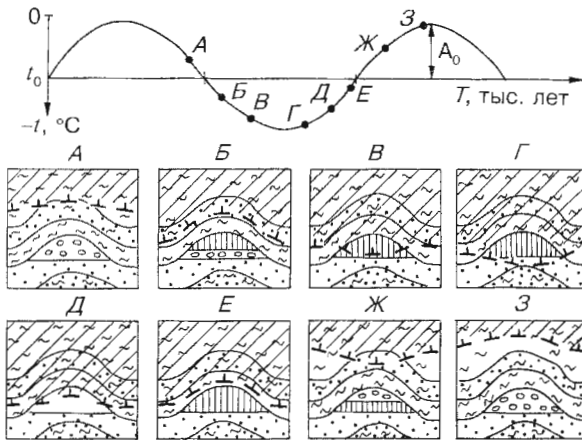


Рис. 6. Обобщенная схема взаимодействия толщи ММП и газовой/газогидратной залежи для случая, когда нулевая геоизотерма при максимальной мощности ММП достигает поверхности последней ($t_0 > A_0$, $T = 40$ тыс. лет.).

Усл. обозн. см. на рис. 5.

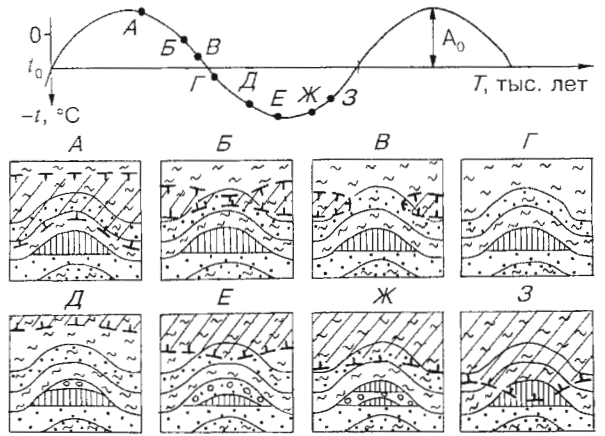


Рис. 7. Обобщенная схема взаимодействия толщи ММП и газовой/газогидратной залежи при условии $t_0 < A_0$ и $T = 40\ 000$ лет.

Характерно, что реликтовая мерзлая толща оттаивает раньше над залежью. Усл. обозн. см. на рис. 5.

лых и талых, газо- и ГГ-содержащих пород, а также положительных и отрицательных температурных аномалий, образующихся при периодических изменениях температуры поверхности массива. На основании 16 вариантов проведенных расчетов построены обобщенные схемы динамики ММП и поведения газа/газогидрата в залежи, представленные на рис. 5—7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты показали наличия взаимодействия, находящего свое выражение в деформациях температурного поля пород, а также в изменении конфигурации подошвы толщи ММП над залежью по сравнению с сечениями, где последняя отсутствует.

Установлено, что положительные и отрицательные температурные аномалии, в том числе и сопровождающиеся изменениями мощностей ММП над залежами, образуются на разных фазах изменения температур поверхности, т. е. как на фазе аградации, так и на фазе дегградации мерзлых толщ пород.

Показано, что при колебаниях с $T = 100\ 000$ лет деформации температурного поля и нижней поверхности ММП существенно меньше по сравнению с деформациями, вызванными колебаниями с $T = 40\ 000$ лет. Так при $T = 100\ 000$ лет (см. табл., вар. А-1 — А-3) различия в мощностях ММП над залежью ($X = 0$) и вне ее ($X = 800$) не превышали 15—25 м, т. е. составляли первые проценты от максимальных за период мощностей (570—650 м). При $T = 40\ 000$ лет (см. табл., вар. Б-1 — Б-7**) эти различия

достигали 40—70 м, что составляет 10—25% от максимальных мощностей ММП (290—400 м).

Сопоставление результатов моделирования показало, что наиболее существенное воздействие на мерзлые толщи и распределение температур проявляется при неглубоком залегании залежей, примерно в интервале глубин 300—500 м, и при колебаниях с $T = 40\ 000$ лет. Залежи в указанном интервале глубин в своем большинстве являются вторичными. Выше уже упоминалось о том, что последние образуются в результате эмиссии газов из основных газовых структур, находящихся на больших глубинах. Восходящие потоки газа в условиях сплошной мерзлоты блокируются и газы переходят в газогидратное состояние вблизи ее нижней границы. Авторами сделано предположение о том, что аномалии температур и мощностей ММП могут служить одним из поисковых признаков на вторичные газовые/газогидратные (подмерзлотные) залежи, а также указывать на существование глубоко залегающих первичных залежей.

Установлено, что влияние газовой залежи и происходящих в ней процессов на температурные поля и конфигурацию подошвы ММП возрастает при приближении фронта промерзания к ее поверхности. Особенно сильно влияние проявляется в те отрезки времени, когда в залежи происходят фазовые превращения (вода—газ) \leftrightarrow ГГ.

Температурные аномалии возрастают при увеличении вертикальных размеров залежи, а также при более высоких величинах скрытой энергии гидратообразования в удельном объеме пород залежи. В последнем случае сравнивался вариант Б-1 и опубликованные ранее результаты расчетов [Тупенко и др., 1990].

Запаздывание температурных колебаний, которое происходит с глубиной, на определенных фазах приводит к возникновению в залежи двух фронтов Γ_2 и Γ_2' , а также к их взаимно противоположному движению в залежи (см. рис. 6).

Полученные при моделировании наибольшие абсолютные величины положительных и отрицательных аномалий нижней поверхности мерзлой толщи, составляющие 30—70 м по центру залежи ($X = 0$) или 10—25% от мощности в 300—400 м, меньше максимальных наблюдаемых в природе [Баулин, 1985]. Это, видимо, указывает на наличие дополнительных причин, создающих большие аномалии мощностей ММП над газовыми структурами.

Установлено, что в случаях, когда нижняя граница ММП (фронт Γ_1) достигает поверхности залежи, находящейся в ГГ состоянии, при продолжающемся движении этого фронта вниз геотерма 0°C резко опускается, образуя большую (30—45 м) отрицательную температурную аномалию (см. табл., вар. Б-2, Б-4 и Б-4*; рис. 6).

Происходит это потому, что в залежи с ГГ отсутствуют энергетические затраты на фазовые превращения. В то же время движение фронта Γ_1 вне контуров залежи относительно замедлено вследствие наличия фазовых переходов воды в лед.

Разложение ГГ в залежи происходит как снизу, так и с двух сторон: со стороны ее вершины и со стороны подошвы залежи. Фронты Γ_2 и Γ_2' в залежи часто бывают криволинейными. В силу этого газогидратная часть залежи имеет сложную форму. В случае, когда разложение ГГ происходит со стороны вершины залежи, не исключено образование пространства, ограниченного сверху литологическим водоупором, а снизу породой, насыщенной ГГ. В этом случае теоретически может быть нарушено условие сохранения давления P , равного гидростатическому. Вместе с тем В.А. Истомин и В.С. Якушев [1992] утверждают, что в природных условиях заполнение порового пространства обычно бывает неполным, и давление, равное гидростатическому, сохраняется.

При условии $t_{\text{ср}} > A_0$ на фазе повышения температуры поверхности земли выше 0°C мерзлая толща сверху протаивает и образуется реликтовый слой ММП. Последний полностью исчезает в первую очередь над залежью, когда последняя находится в состоянии ГГ. Происходит это потому, что слагающие ее породы имеют более высокую теплопроводность, чем талые породы в ее обрамлении. В этом случае над залежью в реликтовой мерзлой толще образуется талое „окно“ (см. табл., вар. А-3, Б-1, Б-2; рис.7).

Авторы благодарят В.П. Мельникова, поддержавшего постановку настоящего исследования, и С.М. Фотиева за внимательное прочтение статьи и ценные замечания. Большая часть работы выполнена за счет средств, полученных по гранту РФФИ (проект 94-05-1795).

Литература

- Баулин В.В. Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР. М., Недра, 1985, 176 с.
- Бык С.Ш., Макагон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М., Химия, 1980, 296 с.
- Гройсман А.Г. Теплофизические свойства гидратов. Новосибирск, Наука, 1985, 94 с.
- Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М., Недра, 1992, 236 с.
- Кудрявцев В. А. Температуры верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР. М., Изд-во АН СССР, 1954, 183 стр.
- Малышев А.Г., Тюшнякова Г. Н. К вопросу о методике расчета теплоты гидратообразования // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1975, вып.27, с. 40—42.
- Макагон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М., Недра, 1974, 208 с.
- Общая геокриология / Ред. В.А.Кудрявцев. М., Изд-во МГУ, 1978, 462 с.

Романовский Н.Н. О взаимодействии криолитозоны и природных газов подземной гидросферы // Вестник МГУ, сер.4, геология, № 3, 1986, с.7—17.

Романовский Н.Н. Криолитозона и зона гидратов природных газов (проблема взаимоотношения и взаимодействия) // Проблемы геокриологии, М., Наука, 1988, с. 35—40.

Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М., Изд-во МГУ, 1993, 335 с.

Теплофизические свойства горных пород / Ред. Э.Д.Ершов. М., Изд-во МГУ, 1984, 203 с.

Типенко Г.С., Серегина Н.В., Романовский Н.Н., Комаров И.А. Математическое моделирование взаимодействия

мерзлой толщи и залежей гидратов природного газа // Вестник МГУ, сер.4, геология, 1990, №4, с. 73—84.

Фотиев С.М. Гидро-геотермические особенности криогенной области СССР. М., Наука, 1978, 236 с.

Черский Н.В., Царев В.П., Никитин С.П. Исследование и прогнозирование условий накопления ресурсов газов в газогидратных залежах. Якутск, 1983, 156 с.

*Поступила в редакцию
29 октября 1997 г.*