

УДК 622.691.4.052:548.562

## Газогидраты метана в осадках озера Байкал

А. Д. Дучков

*АЛЬБЕРТ ДМИТРИЕВИЧ ДУЧКОВ — доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора Института геофизики СО РАН. Область научных интересов: геотермия, геология и геофизика газогидратов, криолитозона.*

*630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3, Институт геофизики СО РАН, тел. (3832)30-25-91, факс (3832)33-25-13, E-mail duch@uiggm.nsc.ru*

Одним из наиболее значительных современных достижений российских исследователей, изучающих природные газовые гидраты, несомненно является открытие гидратов метана в осадках оз. Байкал. До этого были известны только скопления метангидратов в осадках окраинных морей [1]. В 1997—2002 гг. большая группа ученых из России, Бельгии, США, Японии экспериментально установила наличие гидратов метана в осадках пресноводного озера Байкал. В настоящем сообщении кратко описывается история данного открытия и приводятся некоторые результаты комплексных исследований.

Байкал является глубочайшим озером на Земле и одним из самых больших по площади [2]. Он занимает центральную часть Байкальской рифтовой зоны. Длина озера 635 км, ширина варьирует от 25 до 80 км, максимальная глубина 1637 м. В соответствии с рельефом дна выделяют три котловины озера: Южную и Центральную котловины — более глубокие и древние, Северную котловину — более молодую и мелкую. Мощность осадочных пород во впадинах достигает 8—10 км. Скорость осадконакопления оценивается в 4 см/1000 лет.

Центральная часть Байкальской рифтовой зоны, где располагается озеро Байкал, развивается в течение последних 30—40 млн. лет на границе между Сибирской платформой и серией литосферных плит на востоке. Интенсивная сейсмичность, наличие гидротерм по берегам озера являются несомненными свидетельствами геологической активности Байкальского рифта и в настоящее время.

### Геофизические свидетельства существования газогидратов в осадках оз. Байкал

#### Геотермические данные

Для образования газовых гидратов в осадках водоемов необходима совокупность совершенно конкретных условий: низкая, но не обязательно отрицательная температура, высокое давление, достаточные количества воды и газа (обычно метан) [1, 3]. Термобарические условия определяют

зону стабильности газогидратов, границы которой можно определить по фазовым диаграммам, полученным для разных газов и воды (например, для метана, рис. 1).

Термобарические условия, существующие в осадках озера Байкал, были идентифицированы в 70—80-х гг. прошлого столетия после накопления информации о рельефе, температуре дна и тепловом потоке через дно. Сейчас известно, что среднегодовая температура придонной воды на глубинах более 300 м изменяется

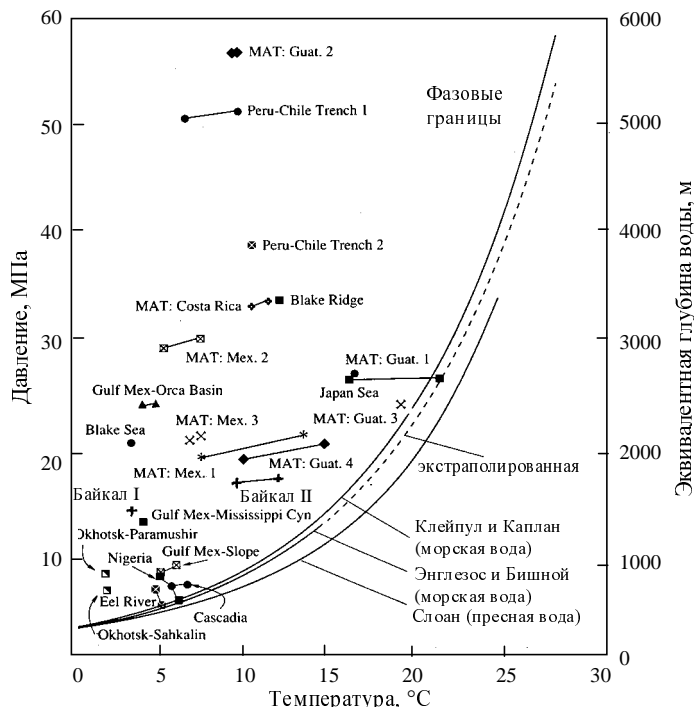
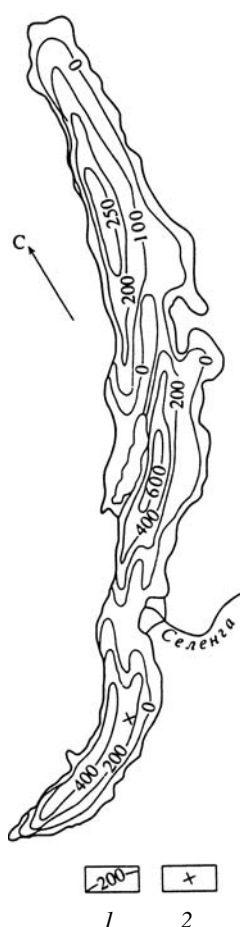


Рис. 1. Фазовые диаграммы свободного метана, гидрата метана, пресной и морской воды (по [4] с изменениями).

Знаками (крестики, кружки, квадраты и др.) отмечены залежи газовых гидратов, обнаруженные к настоящему времени в разных акваториях, включая оз. Байкал (Байкал I — метангидраты на глубине 120—160 м ниже дна, Байкал II — придонные метангидраты). Шкала глубин предполагает градиент давления 10,1 кПа/м



**Рис. 2. Прогнозная карта глубин нижней границы зоны стабильности газовых гидратов в донных отложениях оз. Байкал [6]:**

1 — изолинии глубин нижней границы зоны стабильности, отсчитанные от поверхности дна, м; 2 — место бурения скважины ВDP-97

незначительно и в среднем составляет  $(3,3 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$  [5, 6]. Согласно фазовой диаграмме, определяющей условия стабильности гидратов метана в чистой воде (рис. 1), образование метангидратов при этой температуре возможно при давлении порядка 3,5 МПа. Такое давление обеспечивается слоем воды толщиной более 350—400 м. Следовательно, термобарические условия, благоприятные для формирования гидратов метана, существуют в донных отложениях всей глубоководной части (более 400 м) оз. Байкал, причем верхняя граница зоны стабильности газогидратов совпадает с поверхностью дна. Расположение нижней границы зоны стабильности можно оценить также с помощью фазовой диаграммы по температуре осадков. Отметим, что поддонные температуры достаточно надежно рассчитываются по значениям теплового потока, который сейчас определен в 800 пунктах дна озера [7].

Первая прогнозная карта (рис. 2) глубины расположения нижней границы зоны стабильности газогидратов (или ее мощности) в осадках всего оз. Байкал была опубликована в 1997 г. [6]. Для Байкала характерна значительная мощность зоны стабильности ме-

тангидратов. В целом она коррелирует с глубиной озера: максимальные значения мощности зоны стабильности (более 600 м) прогнозируются в Центральной, наиболее глубокой впадине, в осадках же Северной котловины этот слой лишь местами может превышать 250 м. На глубинах озера менее 400 м, а также в зонах геотермических аномалий газогидратный слой выклинивается. Подчеркнем, что геотермический прогноз позволяет лишь обозначить слой осадков, в котором существуют благоприятные для образования газогидратов термобарические условия, но не дает информации о наличии или отсутствии реальных гидратов.

#### **Сейсмические признаки газогидратов**

Более достоверную информацию о наличии газогидратов в донных осадках может дать сейсмический метод, позволяющий точно определять глубину, на которой проходит нижняя граница реально существующего газогидратного слоя. В сейсмических разрезах эта граница выделяется специфическими отражающими границами, получившими в английской литературе название «Bottom Simulating Reflectors», сокращенно BSR [1]. Подводным бурением в морях установлено, что, как правило, непосредственно выше границы BSR располагаются осадки, сцементированные гидратами метана, а ниже — свободный газ. Таким образом, сейсмический метод позволяет достаточно уверенно прогнозировать существование газогидратов непосредственно выше отражающих границ BSR. Однако он не дает информации о наличии скоплений газогидратов в осадках, залегающих между BSR и поверхностью дна.

В разрезах центральной части Байкала границы BSR были выявлены в ходе масштабных сейсмических работ, проведенных российско-американскими экспедициями в 1989 и 1992 гг. [8]. В стандартных условиях проведения сейсмических исследований границы BSR обычно ориентированы параллельно дну (рис. 3, правая часть), и пересекают косые литологические границы. Для них характерны сильные отраженные сигналы отрицательной полярности, что связано с содержанием свободного газа в подстилающих отложениях. Наличие разломов, по которым возможно происходит конвективный вынос тепла, нарушает нормальный вид отражающих границ BSR (рис. 3, левая часть). В зависимости от типа и возраста разломов (и соответственно наличия или отсутствия дополнительного теплопереноса) возможно значительное смещение границ BSR вверх, вплоть до ее полного разрушения и формирования подводного газового источника (рис. 3, пункты 2300—2350). Эти наблюдения во многом определили дальнейшие более детальные исследования газогидратного слоя в оз. Байкал.

По сейсмическим разрезам с границей BSR были определены глубина ее залегания (или мощность газогидратного слоя) в 780 пунктах центральной части оз. Байкал, точность таких определений составляет около 8 м. Полученные данные использованы для построения карты мощности газогидратного слоя (глубины расположения BSR) в центральной части озера (рис. 4) [9, 10].

Газогидратный слой простирается к северу и к югу от подводной части дельты р. Селенги, которая является основным поставщиком органического материала в озеро. Можно предполагать наличие газовых

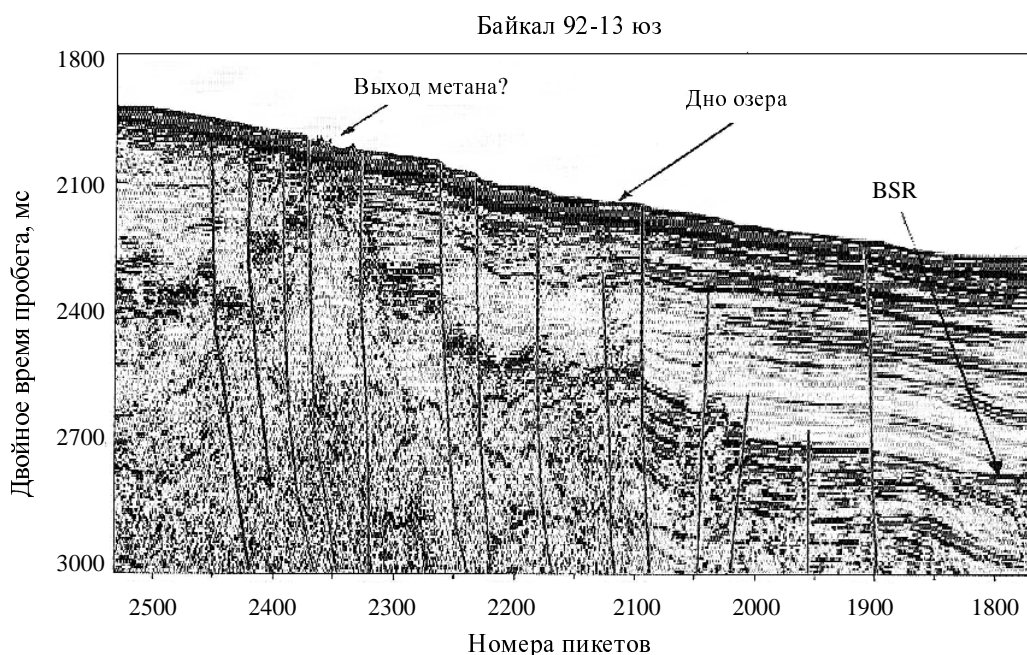


Рис. 3. Временной сейсмический разрез по профилю 92-13 через южную часть Центрально-Байкальской котловины. Разрез иллюстрирует зависимость очертания границы BSR от разломной тектоники [10]

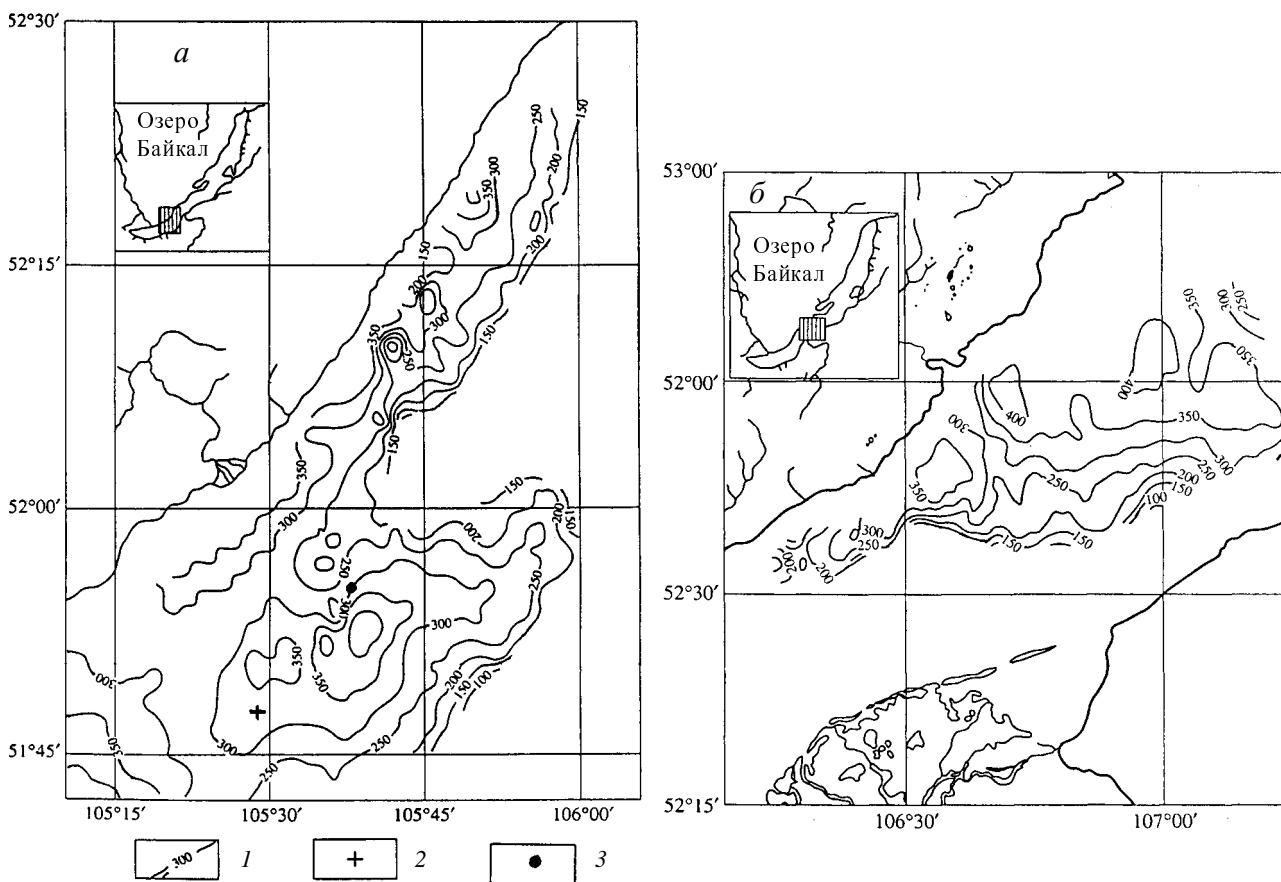


Рис. 4. Карты глубины расположения сейсмической границы BSR (нижняя граница газогидратного слоя) в Южной (а) и Центральной (б) котловинах Байкала [9, 10].

1 — изолинии глубины расположения границ BSR ниже дна (мощность газогидратного слоя), м; 2 — месторасположение скважины BDP-97; 3 — центр участка экспедиционных работ 1999—2000 гг. На врезках указаны районы оз. Байкал, где выделена граница BSR в результате сейсмических работ 1989 и 1992 гг.

гидратов и в осадках других районов Южной и Центральной котловин Байкала. В Северной котловине, где также проводились сейсмические работы, выделить BSR не удалось, хотя и относительно этой территории имеется благоприятный геотермический прогноз (см. рис. 2). Возможно, в северобайкальских осадках по каким-то причинам нет необходимого для образования гидрата количества газа. Некоторая незавершенность изолиний карты по периферии связана либо с отсутствием сейсмических данных, либо с невозможностью трассирования границ BSR в горизонтальных слоях осадков. В некоторых глубоководных районах границы BSR не формируются из-за температурных аномалий или отсутствия достаточного количества газа в осадках.

Согласно сейсмическим исследованиям, газогидратная провинция оз. Байкал состоит из двух блоков, симметрично расположенных относительно дельты р. Селенги. Мощность газогидратного слоя в целом изменяется от 34 до 450 м и составляет в среднем 260 м. В Южной котловине граница BSR погружается в южном направлении от Посольской банки до 450 м (см. рис. 4а). Южнее этой сравнительно локальной аномалии также наблюдается возрастание мощности газогидратного слоя. Это позволяет предположить максимальные ее значения в центральной части Южной котловины. Обнаруживается ряд утолщений газогидратного слоя и вдоль западного берега озера. В юго-восточном направлении в Южной котловине граница BSR монотонно поднимается, доходя до уровня 100–50 м ниже дна, а затем резко исчезает, хотя глубина в этой части озера еще велика (порядка 700 м). Возможно, здесь сказывается влияние теплопереноса по разломам осадочных отложений. Похожая ситуация наблюдается и в Центральной котловине (см. рис. 4б), где газогидратный слой резко обрывается при приближении к восточному берегу. Следует отметить, что в целом параметры газогидратного слоя оз. Байкал варьируют значительно, чем в морях [1]. Это может быть связано с различиями в разломной тектонике.

Информация о границах BSR на сейсмических разрезах оз. Байкал была использована для оценки внутриземного теплового потока новым независимым методом [11]. Так как отражающие границы BSR являются фазовыми границами и их расположение контролируется температурой и давлением, то появляется возможность определить с помощью фазовых диаграмм температуру на глубине расположения этих границ (до 400–600 м), а также геотермические градиенты в этом слое и тепловой поток (при наличии данных о теплопроводности осадков). Этот подход был применен для изучения распределения теплового потока через дно оз. Байкал [9, 10]. Ранее тепловой поток здесь определяли по данным измерения температуры в тонком придонном слое осадков (1–3 м) [5, 7], и существовало опасение, что с глубиной темп нарастания температуры может измениться. Наиболее важным оказалось то, что новые, более обоснованные оценки теплового потока подтвердили в общих чертах достоверность малоглубинных температур и выполненных по ним расчетов глубинных температур.

Главный же итог региональных геофизических работ первого этапа исследований состоит в том, что они позволили выявить бесспорные геофизические признаки существования газовых гидратов в осадках

оз. Байкал. Установлено, что в осадках всей глубоководной части озера термобарические условия благоприятны для образования гидратов метана, а в осадках центральной части озера газогидраты реально существуют, по крайней мере, в районах, где были обнаружены границы BSR.

Анализ результатов многолетних исследований газового потока из осадков оз. Байкал показал, что и ранее обнаруженные газогеохимические аномалии можно интерпретировать как свидетельство разложения газогидратов [12].

Геофизический прогноз о возможности существования газогидратов в осадках оз. Байкал в дальнейшем был успешно подтвержден геологическими работами.

### Геологические свидетельства существования газогидратов в осадках оз. Байкал

#### Исследования подводной скважины BDP-97

В ходе реализации международной программы «Байкал-Бурение» («Baikal Drilling Project») (координатор — Институт геохимии СО РАН) в 1993–1999 гг. было пробурено шесть подводных скважин. Одна из этих скважин, BDP-97, была пробурена в 1997 г. в центре Южно-Байкальской котловины (координаты скважины 51°47'51" с.ш. и 105°29'14" в.д., глубина воды 1433 м) [13, 14]. По геофизическим данным в этом месте прогнозировался достаточно мощный газогидратный слой (300–350 м). Следует отметить, что скважина была пройдена лишь до глубины 225 м из-за сложных геологических условий. Керна удалось поднять только из верхней части ствола скважины (до 42 м) и с глубин 121 и 161 м. Геологический разрез, восстановленный по фрагментам керна и по результатам каротажа, представляется сложным преимущественно песчаными турбидитами (слои мелко-среднезернистого песка толщиной 3–90 см) с прослойками тонких илов или глин. Возраст осадков предположительно голоцен-верхнеплейстоценовый. Наличие плотных глинистых прослоек делает турбидитные отложения естественными ловушками газа, который, накапливаясь, при благоприятных термобарических условиях может перейти в газогидратную форму.

В верхней части разреза обнаружить газовые гидраты не удалось, хотя иногда из ствола скважины наблюдалось усиленное выделение газа (в основном метана, 74% об.) И только с глубин 121 и 161 м, где температура превышает 8–9 °С, были подняты образцы керна, представляющие собой смерзшийся песчано-алевритовый материал, бурно выделявший при нагревании газ. После оттаивания образцы теряли прочность и рассыпались.

Тот факт, что керн, взятый из области положительных температур, при подъеме на поверхность оказался замерзшим, является одним из очевидных признаков наличия газовых гидратов в осадке [1, 3]. Разложение газогидратов при подъеме образцов на поверхность происходит с поглощением тепла, что приводит к охлаждению осадков на 10–15 °С, их замораживанию (покрытию льдом) и замедлению дальнейшего распада гидратов вследствие проявления эффекта самоконсервации [3]. Видимо, эти явления и происходили в ходе бурения скважины BDP-97. Исследование одного из образцов керна непосредственно

на борту бурового комплекса показало, что выход газа из образца в 10 раз превышает газовыделение из осадков других подводных скважин. На основании совокупности данных был сделан вывод о содержании в замерзших образцах керна газогидратов и были приняты меры для их сохранения и возможности проведения комплексных исследований.

Первые сутки образцы керна хранились в морозильной камере, а затем в жидком азоте. В дальнейшем материал транспортировался в лаборатории НИИ Иркутска, Новосибирска (основной объем исследований выполнен в ИНХ СО РАН), Японии и изучался различными физико-химическими методами.

В рамках комплексных исследований были проведены измерения объема газа, выделяющегося при оттаивании осадка, а также газовой смеси рентгенофазовым, дифференциально-термическим, хроматографическим, изотопным и некоторыми другими методами. Определены электропроводность, pH, ионный состав поровых вод (табл. 1).

Таблица 1

Ионный состав водной вытяжки из керна [14]

Ионы	Содержание, мкг/г	Ионы	Содержание, мкг/г
pH	6,28	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	151
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	48	F <sup>-</sup>	6
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	18	Cl <sup>-</sup>	17
Na <sup>+</sup>	12	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,5
K <sup>+</sup>	12	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7
Σ катионов	90	Σ анионов	184
-----			
Суммарное содержание ионов 274 мкг/г исходной породы			

В составе водной вытяжки керна доминируют катионы аммония и гидрокарбонат-анионы, что свидетельствует о наличии восстановительных условий в осадке. Концентрация хлорид-ионов в 1,5—2 раза ниже, чем, например, в поровых водах кернов, отобранных из скважины BDP-93 с глубины более 50 м и не содержащих газовые гидраты [15]. Пониженное содержание хлорид-ионов в поровых водах осадков является важным косвенным признаком присутствия газогидратов в осадках [1].

Комплексные исследования подтвердили наличие в кернах гидратов метана (CH<sub>4</sub> · 6H<sub>2</sub>O) с содержанием около 3,3%(масс). Данные рентгенофазового анализа наилучшим образом соответствуют текстурированному и частично разложившемуся гидрату кубической структуры I, КС-I (такую же структуру имеет и гидрат метана). Газ, полученный из гидрата, состоит на 99% из метана. Присутствует также углекислый газ и в незначительном количестве этан и пропан (< 0,005%). Не вызывает сомнений, что значительная часть находившегося в породе газового гидрата, разложилась при хранении и транспортировке. Истинное его содержание *in situ* значительно выше и может составлять 10—20%(масс.).

Актуальным является вопрос об источнике метана в газогидрате. Изотопный анализ углеродного состава выделенной из гидратосодержащих образцов газовой смеси CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, выполненный масс-спектро-

метрическим методом, показал, что величина δ<sup>13</sup>C для углекислого газа составляет -17‰, а для различных образцов метана -(57,6 ± 68,2)‰. Полученные значения δ<sup>13</sup>C указывают на биогенное происхождение метана, который, скорее всего, образовался при разложении органического материала, привносимого в озеро рекой Селенга. При наличии гидротермальных систем и соответственно термokatализа органического вещества значения δ<sup>13</sup>C обычно находятся в пределах от -50 до -15 ‰ [16].

Таким образом, лабораторные исследования смерзшихся кернов однозначно подтвердили присутствие в образцах гидратов метана биогенного происхождения. Бурение скважины BDP-97 дало первое материальное подтверждение наличия гидратов метана в газогидратном слое Южной котловины Байкала пока только в двух горизонтах, 121 и 161 м.

Отсутствие керна в интервале глубин 42—121 м не позволяет сделать полное заключение о гидратонасыщенности вскрытого скважиной разреза (к тому же скважина BDP-97 не достигла границы BSR). Геофизические исследования в стволе скважины (температурный, электрический, радиоактивный, в частности нейтронный, каротажи), выполненные на разных глубинах (90—121 м), также не внесли ясность в этот вопрос [14]. По каротажным данным хорошо выделяются песчаные пласты, переслаивающиеся с плотными глинистыми осадками. По расчетам пористость песчаников изменяется от 28 до 34%, т.е. они могут быть коллекторами для газа (и газогидратов). Термокаротаж, проведенный, к сожалению, только от дна до 96 м, зафиксировал монотонное повышение температуры до 5 °C на глубине 64 м. В более глубоких пластах наблюдалось резкое снижение температуры до 4,5 °C. Эта отрицательная аномалия возможно является свидетельством существования газогидратов в осадках уже на глубине 64 м. Известны многочисленные примеры появления таких температурных аномалий при проходке подводных скважин гидратонасыщенных осадков [1]. В целом следует признать, что проблема надежного выделения гидратосодержащих слоев по материалам геофизических исследований скважин пока еще не решена.

В месте бурения скважины BDP-97 были проведены дополнительные высокоразрешающие сейсмические работы с целью детального акустического исследования газогидратного слоя [17, 18]. В этом районе сейсмический разрез не показал каких-либо признаков, указывающих на присутствие газогидратов, в том числе на глубинах 120—160 м. Непосредственно под скважиной не выявлена и граница BSR, она появляется на некотором удалении от скважины. К сожалению, приходится констатировать, что существующие сейсмические технологии не позволяют фиксировать пласты даже со значительным содержанием газогидратов (до 10—20%). Поэтому отсутствие в сейсмическом разрезе четких признаков гидратов (границы BSR и др.) не всегда означает их реальное отсутствие в геологическом разрезе.

#### Поиски и открытие поддонных метангидратов

Выше было показано, что в пределах большей части Байкальской впадины существуют благоприятные термобарические условия для образования газовых

гидратов непосредственно в поддонных отложениях. Однако, несмотря на многолетнее изучение [19] верхнего слоя осадков с применением грунтовых трубок длиной до 10 м, газогидраты долгое время не могли обнаружить.

Мировой опыт показывает, что скопления газогидратов в придонных осадках обычно связаны с местами разгрузки подводных метановых источников [1]. Водная толща, постоянно недонасыщенная метаном, как бы отсасывает и растворяет газ, выделяемый из верхнего слоя осадков [20]. Поэтому фоновых потоков газа не хватает для формирования в осадках газовых гидратов. Гидратообразование на поверхности дна возможно только при аномально высокой скорости восходящих газовых потоков.

В пределах Байкала давно известно несколько подводных источников подземных флюидов [5, 21], однако все они расположены на небольших глубинах, где не могут образоваться газогидраты. Необходимо было выявить подобные источники на глубинах более 400 м и, естественно, искать их вдоль активных зон разломов. Как показали сейсмические работы 1989 и 1992 гг., такие зоны могут быть выделены по степени дезинтеграции отражающих границ BSR (см. рис. 3). Поиск поддонных скоплений газогидратов был успешно осуществлен российско-бельгийскими геолого-геофизическими экспедициями 1998—2000 гг., организованными Лимнологическим институтом СО РАН.

Рекогносцировочные сейсмические работы этого периода были сосредоточены в центральной части Байкала. Особое внимание уделялось изучению южнобайкальских осадков, гидратоносность которых ранее была доказана многоканальным сейсмическим методом и бурением. На этапе рекогносцировки с применением различного сейсмического оборудования исследовались как способность сейсмического метода к выявлению и детализации границы BSR в условиях Байкала, так и возможность количественной оценки содержания газовых гидратов и свободного газа в отложениях вблизи границы BSR [17, 18]. Установлено, что сейсмический образ отражающей границы в большой степени определяется частотой сейсмического сигнала. Лучший результат получается при использовании сейсмических источников, генерирующих колебания с частотой не более 40—120 Гц. Установлено также, что значения коэффициентов отражения сейсмических волн, их зависимость от угла падения для различных моделей гидратосодержащего слоя можно использовать для выявления скоплений свободного газа ниже отражающей границы. Так, средний коэффициент отражения порядка 0,063—0,085 свидетельствует о наличии свободного газа ниже границы BSR, а сравнение теоретических и экспериментальных данных о коэффициентах отражения сейсмических волн позволяет ориентировочно судить о количестве газогидратов и свободного газа в отложениях [22, 23]. Обработка по этой методике ряда сейсмических профилей, проходящих через Южную котловину Байкала, показала, что содержание свободного газа и газогидратов вблизи нижней границы зоны стабильности в этом районе не превышает 1—10% порового объема.

Наиболее важный результат на этом этапе рекогносцировки — выявление в северной части Южной котловины аномального района, где наблюдалось

сложное строение границы BSR, ее смещение, а местами и полное разрушение. Дальнейшие комплексные исследования были сосредоточены именно в этом районе на участке дна озера размером 15 × 16 км (центр участка отмечен кружком на рис. 4а), расположенном севернее места бурения скважины BDP-97 и юго-западнее дельты р. Селенги, вблизи Посольского глубинного разлома. Глубина озера в этом районе составляет 1320—1440 м.

Геофизические работы 1999 г. включали сейсмическое и гидролокационное (съемка сонаром бокового обзора) профилирование, эхолотирование дна, измерение теплового потока [17, 18, 24—28, 30—32]. В итоге были получены геолого-геофизические данные, описывающие новый тип активно действующих процессов, которые приводят к дестабилизации газогидратного слоя, к образованию нового слоя газовых гидратов и массивному метановому потоку через дно Байкала.

Методом высокоразрешающего сейсмического профилирования установлено, что в пределах аномального района обычный вид границы BSR, ее параллельность дну существенно нарушается. На рис. 5 приведен разрез верхнего слоя осадков по одному из упомянутых выше сейсмических профилей. Помимо глубинного Посольского разлома разрез осложнен целой серией небольших активных разломов «обратного» направления, прослеживаемых на глубине до 200—300 м. Эти «обратные» разломы, раскалывающие осадки на отдельные сегменты, играют, судя по всему, основную роль в дестабилизации газогидратного слоя. В некоторых таких сегментах граница BSR смещается вертикально вверх на 150—200 м (относительно нормального ее расположения на глубине 300—350 м). В других сегментах, где обнаруживаются локальные вертикальные зоны акустического хаоса, граница BSR полностью разрушается. Такие зоны полного отсутствия сейсмических отражений пронизывают весь газогидратный слой от его подошвы до дна озера и им соответствует структура типа «газовой трубы». Эти структуры интерпретируются как зоны вертикальной флюидной проводимости, вызванной разгрузкой газонасыщенных потоков. При удалении от аномального района граница BSR нормализуется и снова соответствует рельефу дна. Приведенный на рис. 3 сейсмический разрез по одному из профилей, пройденных еще в 1992 г. в Центральной котловине Байкала [10], свидетельствует о том, что в пределах Байкальской впадины существуют и другие подобные аномальные районы.

По геотермическим измерениям, выполненным с использованием отечественного кабельного термографа ГЕОС-Т, зоны дезинтеграции, распада границы BSR фиксируются по интенсивному тепловому потоку (см. рис. 5) [27, 30, 31]. Непосредственно над трубообразной флюидовыводящей структурой плотность теплового потока достигает 110—165 мВт/м<sup>2</sup>, что существенно превышает в данном районе его фоновые значения, 55—90 мВт/м<sup>2</sup>.

Смещения фазовой границы BSR могут быть вызваны значительными изменениями какого-либо из параметров, контролирующих ее положение (температура, давление, количество газа и воды). Обнаружение положительной аномалии теплового потока над зоной дезинтеграции BSR позволяет сделать вывод о ре-

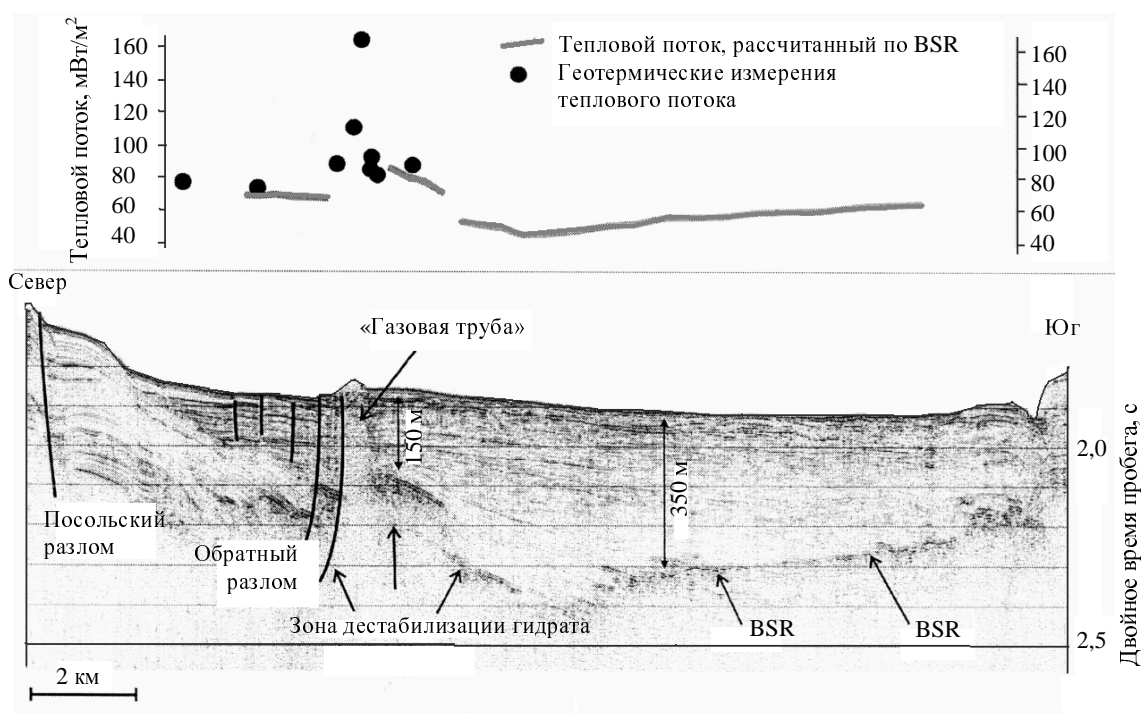


Рис. 5. Сейсмический профиль № 30 через исследованную часть Посольского разлома.

Разрез иллюстрирует разрушение и поднятие границы BSR вблизи малого «обратного» разлома и вариации теплового потока. Профиль пересекает кратер вулкана «Маленький» («газовая труба») [29, 30]

шающем влиянии температурного фактора: изменения положения границы BSR хорошо коррелируют с вариациями измеренного теплового потока. Граница BSR мигрирует вверх, по-видимому, в результате воздействия глубинного теплового импульса, который вызывает распад первоначальной границы BSR (на глубинах 350–400 м) и генерацию большого количества свободного метана, фильтрующегося и поступающего вверх по локальным трубчатым зонам. Следовательно, геотермические измерения, ориентированные на поиск локальных аномалий теплового потока в глубоководной части озера, являются весьма полезной составляющей комплекса методов поиска флюидовыводящих структур.

Заслуживает внимания геотермический метод поисков и картирования донных осадков, содержащих незначительные количества газогидратов [34]. Метод заключается в измерении температуры осадков при размещении в них линейного источника тепла постоянной мощности. При наличии газовых гидратов в осадках фиксируются заметные температурные аномалии, предположительно связанные с распадом гидратов под действием теплового импульса от источника. Метод был опробован в аномальном районе [35] и уже в 1999 г. позволил предсказать наличие в ряде пунктов рассеянных количеств газогидратов в верхнем двухметровом слое осадков.

Исследования эхолотом и локатором бокового обзора дна озера позволили выявить четыре морфологические аномалии, напоминающие по строению подводные грязевые вулканы, получившие названия «Маленький», «Большой», «Старый», «Малютка» [24, 26,

28–32]. Диаметр этих аномальных структур не превышает 500–800 м. В каждой из них выделяются депрессии глубиной до 10 м (кратеры). Над кратерами в придонном слое воды фиксируются 10–25-метровые акустические аномалии (плюмы), свидетельствующие о наличии действующих газовых (или газифлюидных) источников. Вблизи вулкана «Маленький» прошел один из сейсмических профилей, который проявился как приповерхностная аномалия типа «газовая труба» (см. рис. 5). Полученный по этому профилю сейсмический разрез связал в общую картину глубинную структуру с поверхностными аномалиями.

Итак, в результате геофизических работ 1998–1999 гг. в Южной котловине Байкала удалось выявить участок дна, в пределах которого существуют все условия для формирования скоплений газогидратов в придонных осадках.

В марте 2000 г. были организованы геолого-геофизические работы для изучения выявленных газовыводящих структур диаметром 100–200 м на глубинах более 1300 м [29–32]. Исследовать столь малые объекты на дне с дрейфующего судна весьма сложно. Однако можно проводить исследования с поверхности льда. Наличие достаточно мощного слоя льда в зимние месяцы с точки зрения возможностей изучения газогидратов является несомненным преимуществом оз. Байкал по сравнению с другими акваториями. Дальнейшие исследования в районе всех обнаруженных вулканов включали отбор проб осадков в центральных частях кратеров грунтовыми трубками длиной 1–2 м и отбор проб воды и газа для химических анализов.

Наиболее интересные результаты были получены в кратере вулкана «Маленький», где было отобрано 17 кернов на площади радиусом 150 м, длина кернов не превышала 15–67 см. На одной из станций из центра обследуемой площади после нескольких спусков грунтовой трубки были, наконец, подняты белые кристаллы газовых гидратов. Фактически это был первый случай визуального наблюдения кристаллов газогидратов в осадках оз. Байкал. Мощность слоя гидратов составила 10 см в нижней части керна. Выше располагался 25-сантиметровый слой алеврит-пелитового диатомового ила со следами недавней переработки. Очевидно, была вскрыта лишь самая верхняя часть газогидратной залежи. Пройти слой гидратов не удалось из-за ограниченного проникновения грунтовых трубок. Кристаллы газовых гидратов сохранялись в жидком азоте. Лабораторные исследования показали, что они содержат метан биогенного происхождения. В 2002 г. и позднее метангидраты неоднократно доставались здесь также и летом с корабля.

Параллельно с отбором проб осадков проводилось вертикальное зондирование придонного слоя воды прибором CTD (автономные измерения температуры, электропроводности, прозрачности придонной воды и концентрации в ней кислорода) [25, 30–32]. В пределах плюма над кратером вулкана «Маленький» зафиксированы небольшая положительная температурная аномалия порядка 0,002–0,006 °С и отрицательная аномалия по кислороду порядка 0,08–0,09 мг O<sub>2</sub>/кг. Эти аномалии могут быть связаны с окислением поднимающихся пузырей метана (или обломков кристаллических образований газогидратов?). Повторные измерения показали нестационарность этих аномалий (изменяемые параметры изменялись в течение недели), что может свидетельствовать о прерывистой «работе» газового источника в кратере вулкана «Маленький».

В табл. 2 приведены результаты анализа проб поровых вод осадков, отобранных из кратеров газыводящих структур, из фоновых районов, а также воды из газогидратов кратера вулкана «Маленький» [31, 36–40]. Интересно отметить, что концентрация хлорид-ионов в газогидратной воде и в поровой воде осадков оказалась здесь довольно высокой, 12–20 мг/л. Эти значения в целом соответствуют содержанию хлорид-

ионов в воде из газовых гидратов скважины BDP-97 (см. табл. 1) и в поровых водах из глубокозалегающих осадков [15]. В то же время средние концентрации хлорид-ионов в поровых водах придонных осадков Южной котловины намного ниже, порядка 0,8 мг/л. Поскольку Байкал является пресноводным бассейном с очень низкой минерализацией воды, обогащение хлоридом гидратных и поровых вод в осадках кратера вулкана «Маленький» может быть связано только с привнесом хлора из нижерасположенных осадков или даже из береговых гидротермальных источников [31].

Количественный анализ метана в поровых водах придонных осадков показал, что за пределами аномального района фоновое содержание CH<sub>4</sub> составляет 5–10% общего количества газа, т.е. наблюдается большая недонасыщенность осадка метаном. В пределах же кратеров поровые воды осадков содержат до 80–90% биогенного метана. Очевидно, что только здесь существуют благоприятные условия для формирования метангидратов.

Полученные данные о геохимии плюмов и донных осадков кратеров позволяют отнести выявленные газывыводящие структуры к холодным метановым источникам, которые обычны для морских газогидратных провинций [1]. Можно утверждать, что кратеры и глубоководные метановые источники на Байкале формируются над неглубоко залегающей или полностью разрушенной нижней границей газогидратного слоя. Все открытые источники генетически связаны с аномалиями фазовой границы BSR. Такие поверхностные источники возникают в результате прорыва огромных объемов метана (и воды), возникающих при распаде ранее существовавших газовых гидратов. Ориентировочные расчеты подтверждают это. Так, объем метана, который мог быть освобожден, например, при разрушении газогидратов в структуре, фиксируемой вулканом «Маленький», оценивается в 3,9 · 10<sup>9</sup> м<sup>3</sup>. Выброс такого большого количества газа при локализованном распаде газогидратов, несомненно, приведет к увеличению порового давления, к разрывам и перемешиванию вышележащих осадочных пород и формированию на дне метановых (вместе с водой) источников. В то же время часть свободного газа будет снова фиксироваться в гидратной форме на других уровнях, в том числе и в придонных отложениях.

Таблица 2

Средние концентрации (в мг/л) анионов в газогидратной и поровой водах из района образования придонных метангидратов в Южной котловине Байкала [36]

Анализируемый объект	Число определений	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Придонная вода	2	80	1,0	5,2
Газогидратная вода	1	24	19,8	5,8
Поровый раствор				
придонные осадки, все станции	25	45	10,5	4,8
придонные осадки, станции в районе кратера «Маленький»	16	48	13,6	5
концентрации, типичные для придонных осадков котловины вне аномального района	4	76	0,8	5,5



На данном этапе геохимических исследований есть основания предполагать [30—32], что тепловой импульс, необходимый для дестабилизации газогидратов и последующего формирования глубоководных метановых источников, может быть вызван подъемом гидротерм вдоль глубинных разломов к границе BSR. Восхождению флюидного потока возможно способствуют расширение рифтового бассейна и сейсмическая активность, которая в районе Байкала весьма высока [33]. Цикличность этих тектонических процессов может также определять и наблюдаемую ритмичность выделения газовых флюидов.

Поток метана из подводных источников Южной котловины Байкала количественно пока еще не оценен. Однако имеющиеся характеристики источников указывают на значительное количество метана, поступающего из них в воду. Такой метановый поток должен существенно отражаться как на физико-химических характеристиках придонного слоя воды, так и на развивающемся здесь биологическом сообществе.

В связи с этим, параллельно с изучением химического состава вод, газа и осадков проводились микробиологические исследования биоразнообразия бентосных организмов в осадках, а также процессов деструкции органического вещества, сульфатредукции, образования и окисления метана [42—45]. Основная цель этого направления — поиск геохимических и биологических маркеров придонных скоплений метангидратов в условиях пресноводного бассейна. Ранее такие исследования выполнялись только в отношении осадков морских бассейнов.

Установлено, что в осадках обследуемого района Южно-Байкальской впадины развивается разнообразная донная фауна (хирамониды, олигохеды, остракоды и др.). Биологические сообщества, обитающие вокруг газогидратных источников, оказываются под существенным влиянием поступающего из них метана. Плотность некоторых видов бентоса в кратерах вулканов на порядок превышает значения, ранее отмеченные для глубоководных районов Байкала. Во всех пробах осадков обнаружены живые клетки бактерий. Получены данные об интенсивности процессов сульфатредукции (1,3—54 мкг S/кг в сутки) и метаногенерации (до 350 мкл  $\text{CH}_4$ /кг в сутки), которые обеспечивают деструкцию органического вещества в осадках. В целом физико-химические условия, существующие в глубоководной части озера, благоприятствуют деятельности метанообразующих бактерий.

Геофизические данные и результаты бурения были использованы для предварительной оценки запасов метангидратов и соответственно метана в осадках центральной части оз. Байкал [18, 46, 47]. Площадь зоны стабильности газогидратов в расчетах принималась равной 11 тыс. км<sup>2</sup>, мощность газогидратного слоя 100—200 м, пористость осадков 50%, содержание газогидратов 1 или 10% порового объема. При этих условиях осадки центральной части озера могут содержать максимум  $(40—50) \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> метангидрата. При факторе расширения газа, равном 164, максимальный объем метана (при нормальных условиях) в газогидратном слое составит не более  $9 \cdot 10^{12}$  м<sup>3</sup>, это всего лишь 13% запасов месторождения Blake Ridge в Северной Атлантике [41].

## Заключение

Многолетние исследования газогидратных залежей в акватории оз. Байкал завершились открытием скоплений гидратов биогенного метана на разных глубинах в донных отложениях этого пресноводного бассейна: непосредственно выше границы BSR (косвенные данные), на глубинах 121 и 161 м и в придонных осадках.

В Южно-Байкальской впадине выявлен район развития флюидовыводящих структур, представляющих собой подводные грязевые вулканы с кратерами и холодными метановыми источниками. В пределах одного из этих кратеров открыты залежи поддонных газогидратов. Аномальные структуры встречаются в тех местах, где нижняя граница газогидратного слоя (BSR) расположена близко ко дну или разрушена. Разрушение BSR может быть вызвано восходящим (по разломам) потоком гидротермальных флюидов. Исследования привели к открытию не известного ранее процесса дестабилизации (и одновременно образования на других глубинах) природных метангидратов, идущего в условиях рифтового пресноводного бассейна. Этот процесс сравнительно быстротечен и ограничен количеством газогидратов, мощностью и длительностью теплового импульса. Имеющиеся данные свидетельствуют, что стабильность газогидратного слоя, обычно располагающегося на небольших глубинах ниже дна озера, может быть легко нарушена не только поверхностными факторами (изменение уровня воды или придонной температуры), но также и глубинными (эндогенными) факторами. Поток метана, возникающий при распаде гидратов, может существенно повлиять на физико-химические характеристики придонных вод и осадков и отразиться на биоте. Это необходимо учитывать при изучении экосистем Байкала.

Работы по исследованию газогидратов в осадках оз. Байкал продолжаются в рамках новых международных и российских проектов. На это, в частности, ориентирован и начавшийся в 2003 г. Интеграционный проект СО РАН «Природные и синтетические газовые гидраты». Байкал представляет исключительные возможности для комплексного изучения природы и закономерностей формирования скоплений гидратов в донных осадках. На озере можно проводить исследования как летом с кораблей, так и зимой с поверхности льда. Необходимо продолжить развитие и совершенствование сейсмических (и других геофизических) методов изучения структуры BSR, выделения гидратосодержащих пластов в пределах газогидратного слоя, поисков и оконтуривания районов дестабилизации BSR и приуроченных к ним поддонных скоплений гидратов. Актуальной задачей является изучение особенностей геологического строения, объема и структуры тел поддонных гидратов, как наиболее доступных и оказывающих прямое воздействие на гидродинамику, вентилиационные процессы и биоту озера.

\* \* \*

Исследования на разных этапах финансировались грантами YSF-00-4129, INTAS № 96-1915, правительства Бельгии, РФФИ и Министерства образования РФ, Интеграционными проектами СО РАН. Данная работа поддержана грантом ИНТАС № 01-2309 и Интеграционным проектом СО РАН № 147 «Природные

и синтетические газовые гидраты». Считаю своим долгом отметить, что успешные поиски поддонных газовых гидратов в Южном Байкале стали возможны только в результате заинтересованного отношения к этим исследованиям дирекции и сотрудников Лимнологического института СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994, 192 с.
2. Гаазий Г.И. (гл. ред.) Атлас Байкала. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993, 159 с.
3. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992, 236 с.
4. Sloan E.D. Geological society special publication № 137, 198, p. 31—50.
5. Голубев В.А. Геотермия Байкала. Новосибирск: Наука, 1982, 150 с.
6. Голубев В.А. Докл. РАН, 1997, т. 352, 5, с. 652—655.
7. Дучков А.Д., Лысак С.В., Голубев В.А., Дорофеева Р.П., Соколова Л.С. Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 3, с. 287—303.
8. Hutchinson D.R., Golmshtok A.Ya., Scholz C.A. e.a. Eos Trans. Am. Geophys. Union, 1991, v. 72, p. 307.
9. Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р. и др. Геология и геофизика, 1997, т. , № 10, с. 1677—1691.
10. Golmshtok A.Ya., Duchkov A.D., Hutchinson D.R., Khanukaev S.B. Int. Journ. Earth Sci., 2000, v. 89, № 2, p. 193—211.
11. Yamano M., Uyeda S., Aoki Y., Shipley T.H. Geology, 1982, № 10, p. 339—343.
12. Гранин Н.Г., Гранина Л.З. Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 7, с. 629—637.
13. Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Гелетий В.А. и др. Докл. РАН, 1998, т. 362, №4, с. 541—543.
14. Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Дучков А.Д. и др. Геология рудных месторождений, 2000, т. 42, № 1, с. 25—37.
15. Коллектив исполнителей Байкальского бурового проекта. Геол. и геоф., 1995, т. 36, № 2, с. 3—22.
16. Welham J.A. Gas hydrates relevance to world margin stability and climatic change. Tutorial book of First MASTER Workshop, Gent, 1996, p. 183—198.
17. Vanneste M., De Meersman K., De Batist M., Versteeg W., Golmshtok A., Kremlev A. VI International Conference on Gas in Marine Sediments (5—9 September, 2000) Abstracts book. St.Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2000, p. 136—137.
18. Vanneste M., De Batist M., Golmshtok A., Kremlev A. Marine Geology, 2001, v. 172 (1—2), p. 1—21.
19. Голдырев Г.С. Осадкообразование и четвертичная история котловины озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1982, 182 с.
20. Егоров А.В., Рожков А.Н., Возт П.Р., Крейн К. Газогидраты непосредственно на морском дне: природное явление и его теоретическое объяснение. М.: Институт проблем механики РАН (препринт 616), 1998, 22 с.
21. Голубев В.А. Докл. РАН, 1993, т. 328, № 3, с. 315—318.
22. Кремлев А.Н., Гольмшток А.Я., Бушенков Ю.Н., Ваннысте М. В кн.: Международная конференция Environmis 2000. Программа и тезисы. Томск, 2000, с. 47.
23. Kremlev A.N., Golmshtok A.J., Bushenkov Y.N., Vanneste M. Indo-Russian ILTP Workshop on Gas Hydrates (13—15 March, 2000). New Delhi, India. Abstract, p. 16—17.
24. De Batist M., Klerkx J., Vanneste M., Poort J., Van Rensbergen P., Nus R., Golmshtok A., Kremlev A., Khlystov O. VI International Conference on Gas in Marine Sediments (5—9 September, 2000). Abstracts book. St.Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2000, p. 22—23.
25. Granin N.G., Klerkx J., Zhdanov A.A., Gnatovsky R.Yu., Tsekhanovsky V.V. Ibid., p. 40—41.
26. Klerkx J., Nus R., De Batist M., Khlystov O., Van Rensbergen P., Poort J. Ibid., p. 56.
27. Poort J., Vanneste M., De Batist M., Klerkx J. Ibid., 2000, p. 113.
28. Van Rensbergen P., De Batist M., Klerkx J., Poort J., Nus R., Vanneste M., Granin N., Krinitsky P. Ibid., p. 138—139.
29. Хлыстов О.М., Де Батист М. В сб. избр. тр. науч.-техн. конф. ФГГГ «Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований». 12—15 апреля 2001 г. Иркутск. Иркутск: ИрГТУ, 2001, с. 55—61.
30. De Batist M., Klerkx J., Van Rensbergen P., Poort J., Khlystov O., Vanneste M., Golmshtok A., Granin N., Grachev M., Krinitsky P. In: Proceedings of the 4th International Conference on Gas Hydrates, 2002, p. 251—256.
31. Van Rensbergen P., De Batist M., Klerkx J., Nus R., Poort J., Vanneste M., Granin N., Khlystov O., Krinitsky P. Geology, 2002, v. 30, № 7, p. 631—634.
32. De Batist M., Klerkx J., Van Rensbergen P., Vanneste M., Poort J., Golmshtok A., Kremlev A., Khlystov O., Krinitsky P. Terra Nova (в печати).
33. Solonenko A., Solonenko N., Melnikova V., Shteiman E. Bulletin des centres de recherches exploration-production ELF-Aquitaine, 1997, v. 21, p. 207—231.
34. Голубев В.А. Доклады РАН, 1998, т. 358, № 3, с. 384—388.
35. Kaulio V., Poort J., Klerkx J., Morozov S. VI International Conference on Gas in Marine Sediments (5—9 September, 2000) Abstracts book. St.Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2000, p. 54—55.
36. Granina L., Golobokova L., Zemskaaya T., Khlystov O., Granin N. Ibid., p. 37—39.
37. Matveeva T.V., Kaulio V.V., Mazurenko L.L., Klerkx J., Soloviev V.A., Khlystov O.M., Kalmychkov G.V. Ibid., p. 91—93.
38. Гранина Л.З., Каллендер Е., Ломоносов Л.С., Матц В.Д., Голобокова Л.П. Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 1—2, с. 362—372.
39. Matveeva T.V., Mazurenko L.L., Soloviev V.A., Klerkx J., Kaulio V.V., Khlystov O. European Union of Geosciences Journal of Conference Abstracts, 2001, v. 6, p. 154.
40. Matveeva T.V., Mazurenko L.L., Soloviev V.A., Klerkx J., Kaulio V.V., Khlystov O., Prasolov E. Terra Nova (в печати).
41. Соловьев В.А. Геол. и геоф., 2002, т. 43, № 7, с. 648—661.
42. Namsaraev B.B., Zemskaaya T.I., Dagurova G.A., Dultseva N.M., Khlystov O.M., Granina L.Z., Golobokova L.P., Sitnikova T.Ya., Proviz V.I. VI International Conference on Gas in Marine Sediments (5—9 September, 2000) Abstracts book. St.Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2000, p. 102—103.
43. Zemskaaya T., Namsaraev B., Khlystov O., Dagurova O., Shubenkova O., Chernitsina S., Proviz V. VIII International congress of ecology «Ecology in changing world». Abstract. Seul, Korea, 2002, p. 302.
44. Шубенкова О.В., Дагурова О.П., Черницына С.М., Хлыстов О.М. В кн.: Материалы российской научно-практической конференции «Оценка современного состояния микробиологических исследований в Восточно-Сибирском регионе». Иркутск, 2002, с. 127—130.
45. Zemskaaya T.I., Khlystov O.M., Klerkx J., Grachev M.A. e. a. Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen (в печати).
46. Голубев В.А. В кн.: Всероссийская научная конференция «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна». Тезисы докладов, часть 4. Тюмень, 2000, с. 14—17.
47. Хлыстов О.М., Шульга В.В., Осотов Э.Ю., Сапранков С.А., Де Батист М. В кн.: Сб. трудов научно-технической конференции «Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований». Иркутск, 2002, с. 71—80.