

Наледи, образованные штормами в зимний период в проливе Малые Ольхонские Ворота. Фрагменты наледей внешне очень похожи на газовый гидрат. Фото О. Хлыстова

# ГАЗОГИДРАТЫ пресноводного «ОКЕАНА»

Кристаллы газовых гидратов состоят из молекул газа, впаянных в каркас из молекул воды. Фото О. Хлыстова



Ян КЛЕРКС — член-корреспондент Бельгийской Королевской академии морских наук, почетный профессор СО РАН. Занимается исследованиями на озере Байкал с начала 90-х годов. Под его руководством впервые были отобраны образцы придонных газогидратов в Южно-Байкальской впадине



Ян КЛЕРКС, Марк Де БАТИСТ, Николай ГРАНИН, Тамара ЗЕМСКАЯ, Олег ХЛЫСТОВ

Все результаты, опубликованные в этой статье, были получены международной командой ученых, работавших по российско-бельгийскому проекту при поддержке INTAS, СО РАН и РФФИ (1998—2004 гг.).

Руководители проектов:

член-корреспондент Бельгийской Королевской академии морских наук, почетный профессор СО РАН Ян Клеркс (г. Тервюрен, Бельгия);

профессор морской геологии, седиментологии и геодинамики Марк Де Батист (г. Гент, Бельгия);

кандидат биологических наук, ученый секретарь и старший научный сотрудник лаборатории микробиологии Лимнологического института СО РАН Тамара Ивановна Земская (г. Иркутск, Россия);

кандидат географических наук, заведующий лабораторией гидрологии и гидрофизики Лимнологического института СО РАН Николай Григорьевич Гранин (г. Иркутск, Россия).

*Байкал — одно из самых крупных и глубоких озер мира — уникален во многих отношениях. Он широко известен чистотой своей воды и эндемичной флорой и фауной. Но это еще и единственный пресноводный водоем на планете, где найдены газовые гидраты.*

## МЕТАН В «КЛЕТКЕ»

На непосвященный взгляд, *газовые гидраты* представляют собой обычные грязноватые комочки льда. На самом деле это уникальная твердая смесь газа и воды, в которой молекулы газа «впаяны» в каркас из молекул воды. При этом объемное содержание газа может достигать 150–180 единиц на единицу объема гидрата!

В природе газогидраты образуются в глубоководных осадках морей и океанов и в районах вечной мерзлоты — главным образом из углеводородных газов, чаще всего метана. Присутствие газогидратов в вечной мерзлоте было предсказано по данным каротажа скважин и затем обнаружено во многих арктических районах Азии, Северной Америки и Европы, где мерзлые породы распространяются на глубину более 250 метров. Подавляющее же большинство скоплений газогидратов находится в глубоководных акваториях морей и океанов, в основном на континентальных склонах и подводных поднятиях, в условиях высокого давления и низких температур.

Газогидраты образуются в консолидированных и рыхлых осадках в пределах зоны, где они могут находиться в состоянии термодинамической устойчивости. Это так называемая *зона стабильности гидратов (ЗСГ)*, которая в морских донных отложениях на средних и низких широтах прослеживается на глубинах свыше 500 м, а на высоких широтах — начиная с глубины около 200 м или глубже, в зависимости от местных температурных условий.

В районах вечной мерзлоты Аляски, Канады и России гидраты метана формируются при невысоком давлении и низких температурах, образуя сложные криогенные образования из обычного льда и собственно гидратов. Зона стабильности льда в этих районах начинается непосредственно от поверхности земли (около 0 °С). Зона же стабильности гидратов находится ниже: верхняя ее граница определяется средней температурой поверхности, внешним давлением и температурным градиентом, нижняя — опускается ниже границы зоны стабильности льда.

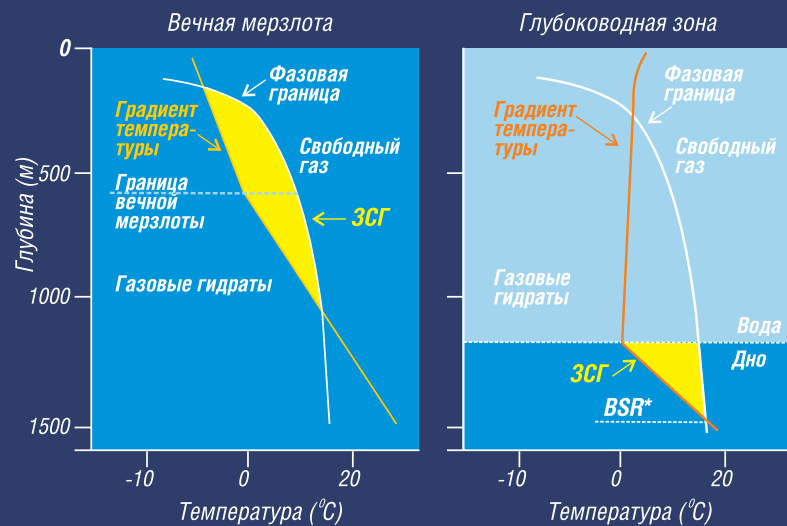
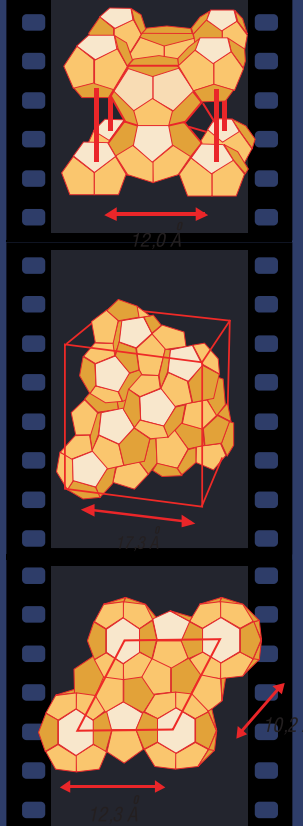


Диаграмма РТ-условий зоны стабильности газовых гидратов. Газогидраты образуются в осадках в пределах зоны, где они могут находиться в состоянии термодинамической устойчивости, — зоны стабильности гидратов (ЗСГ)



## НАКАЗАНИЕ ИЛИ БЛАГО?

Интерес к природным гидратам метана в последнее время значительно возрос в связи с исследованиями в области климата и природной среды, а также по ряду экономических причин.

Во-первых, гидраты, содержащие огромные количества метана, являются источником так называемого «парникового» газа, способного вызвать глобальные изменения природной среды и климата. Кстати сказать, эффективность метана как парникового газа в 21 раз превышает эффективность углекислого газа! Поскольку газогидраты существуют на границе фазовой устойчивости, то даже незначительные изменения температуры и давления ведут к их необратимому разрушению с выделением метана. Выделение большого количества метана может ускорить глобальное потепление в десять и даже в сто раз, что, в свою очередь, вызовет дальнейшее разложение природных гидратов. Полярные и приполярные районы Северного полушария, где сосредоточены большие запасы газогидратов, являются, таким образом, зонами повышенного экологического риска.

Но это не единственная опасность, которая может исходить от газогидратов. Дестабилизация газогидратов на континентальных склонах, спровоцированная изменениями температуры придонных вод или падением

*Подавляющее большинство скоплений газогидратов было найдено в глубоководных акваториях внутренних и окраинных морей, в условиях высокого давления и низких температур*

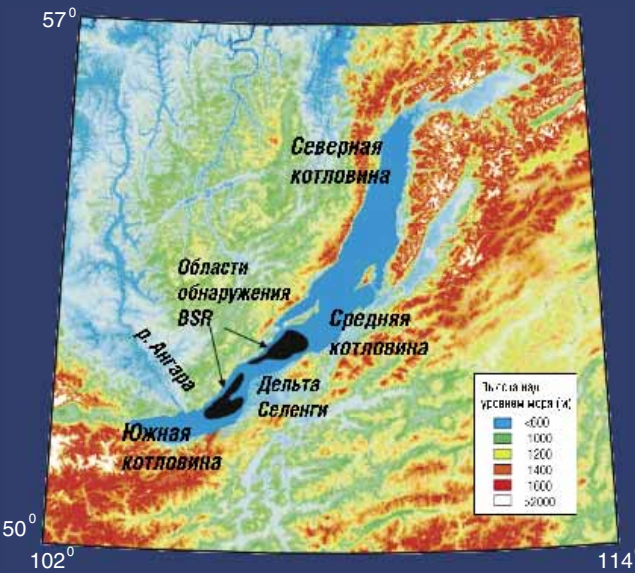
*\*В англоязычной литературе такие границы называются Bottom Simulating Reflectors (BSR), буквально «отражающие границы, повторяющие рельеф дна». Этот термин закрепился и у русских геологов и геофизиков, они предпочитают так и говорить: «граница BSR». — Прим. пер.*



уровня моря, может стать причиной подводных оползней. Последние, в свою очередь, могут вызвать цунами и катастрофическое затопление прибрежных районов. И хотя процесс возникновения подводных оползней под влиянием газогидратов понят еще не до конца, они, тем не менее, представляют собой источник геологической опасности в морях и океанах.

Но в любом деле есть и свои светлые стороны. Ведь метан является источником органического углерода, а его общее расчетное количество в виде гидрата превышает  $10^{19}$  г — больше, чем во всех залежах планеты вместе взятых. Поэтому газогидраты рассматриваются как возможный альтернативный источник энергетического сырья, потенциальное топливо будущего. Причем самого ближайшего будущего, что предполагает промышленное освоение запасов газогидратов в Мировом океане уже в следующие десятилетия.

**Факелы природного газа, скопившегося подо льдом озера в районе дельты реки Селенги. Фото О. Хлыстова**



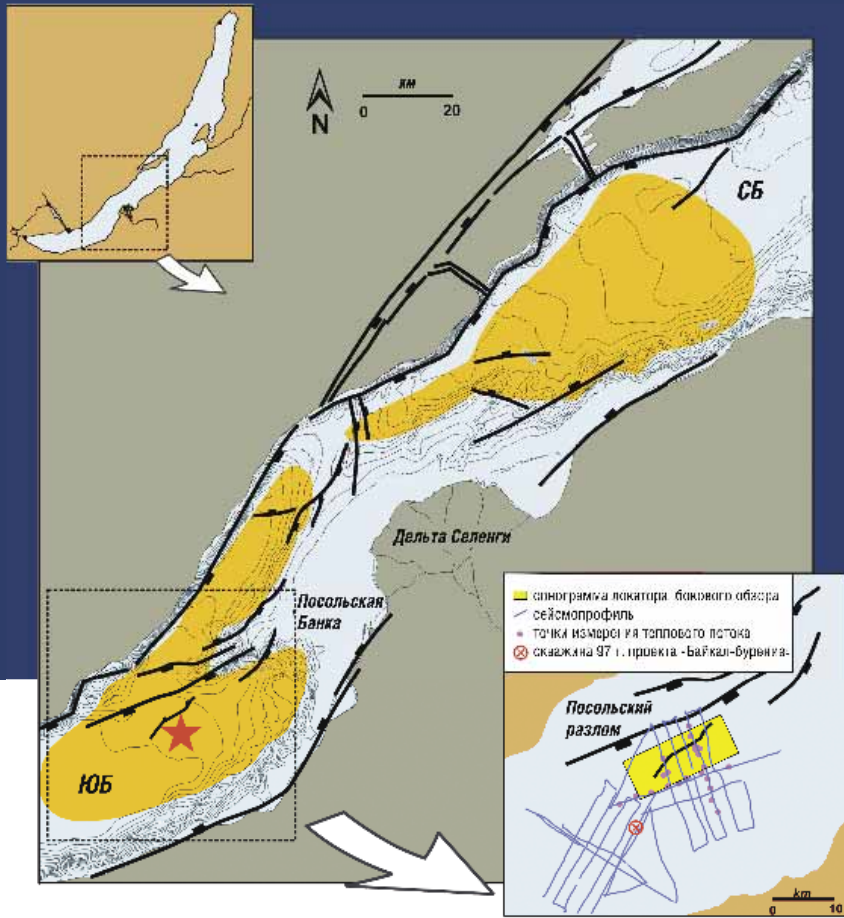
Районы расчетной мощности слоя осадков, возможно, содержащих газогидраты в акватории оз. Байкал

## БАЙКАЛЬСКИЕ ОТКРЫТИЯ

В последние десятилетия скопления газогидратов найдены во многих уголках Мирового океана. Это не могло не привлечь внимания геологов и геофизиков, изучающих донные осадки пресноводного «океана» Байкал. Как уже говорилось, для образования газогидратов в донных отложениях водоемов требуются определенные условия. Осадки должны содержать достаточное количество газа и воды, а главное — находиться под большим давлением и при низкой температуре, т. е. при глубине воды свыше 500 или даже 700–800 м. Именно такие условия характерны для глубоководных районов Байкала. При этом концентрации метана должны быть особенно высоки в местах впадения рек, в частности, вблизи дельты Селенги. Это связано с тем, что притоки озера несут с собой большое количество органического вещества, которое осаждается на дне и в донных отложениях преобразуется в метан.

Косвенные признаки присутствия газогидратов в осадках можно обнаружить по данным непрерывного сейсмопрофилирования методом отраженных волн. Поскольку осадки, содержащие газогидраты, отличаются по физическим свойствам от нижележащих слоев, на профиле возникает кажущаяся отражающая граница, соответствующая по форме контурам поверхности дна\*.

На Байкале такие границы, отождествляемые с нижней границей газогидратного слоя, впервые заметил А. Гольмшток во время российско-американских сейсмических исследований осадочного наполнения Байкальской впадины (1989–1992 гг.). Эти границы, выявлен-



Районы расчетной мощности газогидратного слоя (выше BSR, показано желтым) вблизи дельты р. Селенги на глубинах свыше 580 м, т. е. на глубоководном склоне дельты и на плоских участках дна прилегающих озерных котловин. Черными линиями показаны разломы горных пород и осадков, звездочкой — место находки газогидратов при бурении в 1997 г. (BDP-97).

На врезке: фиолетовые линии — профили сейсмоакустической съемки 1997 г., светло-желтым цветом обозначена площадь съемки глубинным локатором бокового обзора, фиолетовые точки — измерение теплового потока.

ЮБ — Южный Байкал  
СБ — Средний Байкал

### ИЗ БЕЛЬГИИ И САНКТ-ПЕТЕРБУРГА — НА БАЙКАЛ

ные и прослеженные на большой площади к северу и к югу от дельты Селенги, были первыми свидетельствами присутствия газогидратов на Байкале. А в 1997 году в буровом керне в ходе работ по проекту «Байкал-Бурение» (под руководством академика М. И. Кузьмина, директора Иркутского института геохимии СО РАН) были обнаружены сами кристаллы. Образцы были подняты с глубин 120 и 160 м под поверхностью дна. Это открытие окончательно подтвердило, что донные отложения Байкала действительно содержат газовые гидраты.

Внимание исследователей байкальских донных осадков привлекла необычная форма границы ЗСГ. Уже А. Гольмшток заметил, что на сейсмических профилях она, против обыкновения, не повторяет в точности рельефа дна. Граница имела неровную форму и местами прерывалась вблизи разломов. Гольмшток предположил, что в этих местах устойчивость гидратов нарушена, газогидратный слой прерывается и метан прорывается на поверхность дна озера.

Чтобы получить точное изображение рельефа дна, коллективом российских и бельгийских ученых было решено провести сейсмопрофилирование донных отложений с высоким пространственным разрешением в сочетании с локацией бокового обзора. Проект был профинансирован фондом INTAS, а экспедицию под руководством профессора Марка Де Батиста (университет г. Гента) организовал Лимнологический институт СО РАН (г. Иркутск).

Летом 1999 года были получены детальные разрезы ЗСГ в Южно-Байкальской котловине южнее дельты Селенги, на которых хорошо видны участки нарушенного слоя газогидратов и вертикальные каналы, по которым газ поднимается вдоль разломов к поверхности дна. На снимке, сделанном с помощью локатора бокового обзора специалистами из ВНИИ океанологии (г. Санкт-Петербург), видна цепочка газовыделяющих структур, очень похожих на грязевые вулканчики. Эта цепочка, около 2 км шириной, тянется вдоль зоны разломов, где глубина воды достигает 1350 метров.



Пузырьки газа на поверхности озера — следы восходящих газовых факелов, поднимающихся со дна. Фото Н. Гранина

Грязевые вулканы по форме очень напоминают обычные. Но, чтобы убедиться в этом, нужно запастись специальным оборудованием или опуститься под воду. Выбрасывая струи жидкости и газа высотой до 25 метров, они проявляют себя на поверхности воды лишь лопающимися пузырьками газа



Сейсмоакустический разрез Южно-Байкальской котловины, на котором видно нарушенное строение границы BSR, с приподнятыми участками и разрывами. Более детально показаны очаги разгрузки газа в районе «грязевых вулканов» Старый и Малютка (проект INTAS, RSMG (Марк Де Батист))

### «ГАЗИРОВКА» ИЗ ВУЛКАНОВ

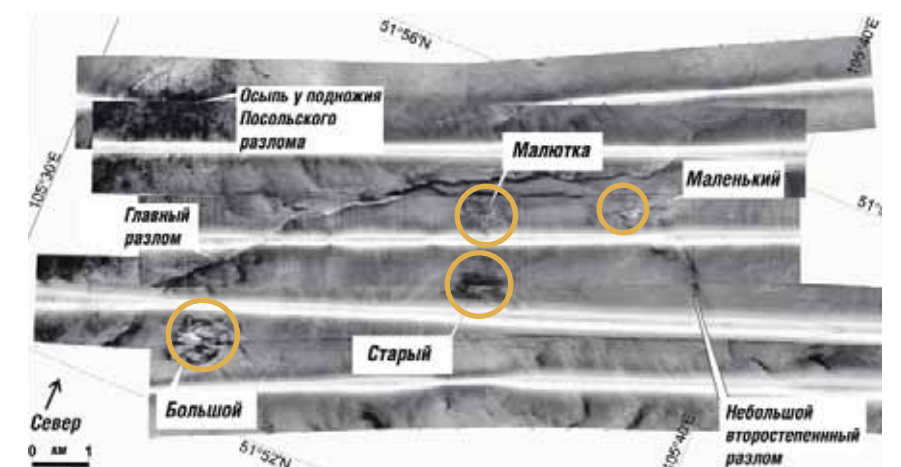
Грязевые вулканы — это донные структуры, напоминающие по форме обычные вулканы. Они появляются, когда вода, газ и ил выталкиваются из нижележащих слоев на поверхность дна моря под действием напряжения, накопленного на глубине. Во время извержений и даже в период затишья такие грязевые вулканы выбрасывают большие количества жидкости и газа. Их можно часто увидеть в тектонически активных районах или в зонах быстрого осадконакопления. Грязевых вулканов особенно много в Черном и Каспийском морях.

На сонограммах байкальских грязевых вулканов видны струи длиной около 25 м, направленные от источников газа. Химический анализ воды действительно показал повышенное содержание метана в этих струях. Это открытие очагов разгрузки газа на дне Байкала позволило предположить, что внутри грязевых вулканов могут находиться приповерхностные газогидраты, как, например, в Черном море.



Газовый гидрат метана Южной котловины Байкала. Фото А. Егорова

На сонограммах, полученных с помощью локатора бокового обзора, видны четыре крупных поднятия. Батиметрия этих четырех участков, названных Маленький, Большой, Старый и Малютка, детально исследована методом лучевого эхолотирования. Эти поднятия, являющиеся грязевыми вулканами, имеют неправильную форму и достигают 800 м в поперечнике и 200 метров — в высоту (проект INTAS, технический исполнитель — группа Sonic, ВНИИ океанологии, Санкт-Петербург)

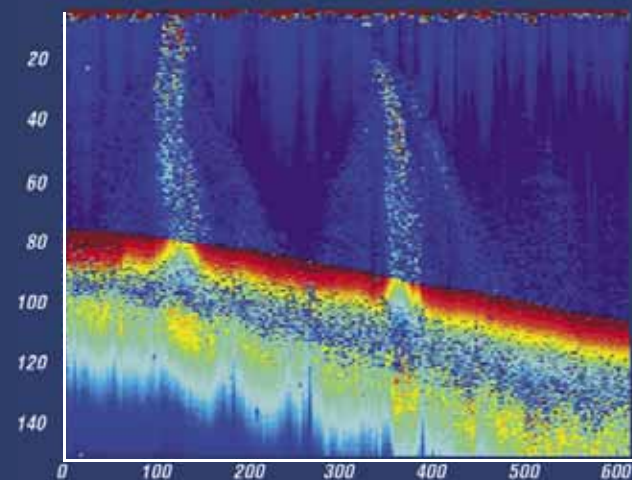


Само название «приповерхностные газогидраты» предполагает, что они находятся в самых верхних слоях донных отложений. Поэтому образцы для исследований были подняты грунтовыми трубками непосредственно над выходами газа. Эти места были заранее определены благодаря предварительному отбору проб со льда во время зимней экспедиции 2000 года под руководством Я. Клеркса, организованной Лимнологическим институтом СО РАН.

Из одного грязевого вулкана, с глубины от 15 до 40 см ниже дна, удалось извлечь слой газогидратов мощностью 10 см, состоящий из крупных кристаллов размером до 7 см. Очевидно, что мелкие кристаллики газогидратов содержались в керне и других местах, судя по строению осадочной толщи и другим показателям. Однако они, к сожалению, разрушились во время подъема колонок на поверхность.

Донные отложения Байкала представляют собой чередующиеся слои глин и темно-серого ила, насыщенного остатками диатомовых водорослей. Обнаружилось, что диатомовые слои вблизи грязевых вулканов содержат виды, вымершие почти 3 млн лет назад. В обычной последовательности осадочных слоев горизонт, содержащий эти водоросли, должен находиться на глубине около 300 метров. Но, как это обычно бывает в грязевых вулканах, флюиды, образующиеся на такой глубине, поднимаются к поверхности и во время извержений выносят осадочный материал наверх. Неудивительно, что и глубоко захороненные диатомовые водоросли были подняты к поверхности по каналам вулканов.

Гидроакустическая съемка газовых факелов выбросов метана в водную толщу из осадков оз. Байкал. Эхолотограмма Н. Гранина



#### МЕТАН И КАЧЕСТВО БАЙКАЛЬСКОЙ ВОДЫ

Когда было обнаружено, что из донных осадков через подводящие каналы в воду Байкала поступает метан, возник вопрос: как метан влияет на качество байкальской воды и строение водной толщи?

Изучением этого вопроса активно занялись в последние годы. На дне вблизи источников газа было отмечено лишь небольшое повышение содержания метана, а наиболее высокие концентрации обнаружались в верхних 25–50 м воды. Выяснилось, что метан из донных очагов разгрузки оказывает гораздо меньшее влияние на химический состав воды, чем метан из поверхностных источников. Распределение метана по площади в поверхностных водах наглядно свидетельствует о связи его поступления с речным стоком.

С другой стороны, данные многолетних исследований вертикального распределения физических свойств воды указывают на существование аномального слоя глубинных вод в Южно-Байкальской котловине, температура в котором возрастает с глубиной. В пробах воды из этого слоя иногда обнаруживаются повышенные концентрации метана и реже — немного сниженные кон-

Во время ледовой экспедиции с использованием специальной лебедки были отобраны образцы приповерхностных газогидратов. Фото Н. Гранина



*Таким поэтическим термином — ФЛЮИДЫ (от лат. fluidus — «текущий») — геологи называют жидкие и газообразные легкоподвижные компоненты магмы или циркулирующие в земных глубинах насыщенные газами растворы*

центрации кислорода. Происхождение аномального слоя связывают с перемешиванием воды под воздействием разгрузки метана из донных источников. Таким образом, метан, существенно не меняя химический состав байкальской воды, тем не менее, оказывает влияние на строение водной толщи.

Детальные исследования рельефа дна озера и строения осадочной толщи различными дистанционными методами продолжают. Выявляются все новые выходы метана, другие участки нарушения газогидратного слоя и очаги разгрузки метана помимо тех, что были найдены в Южной котловине. Выяснилось, что гидраты метана содержатся в верхнем слое осадков на обширных площадях Среднего и Южного Байкала. Остается, однако, один важный вопрос: почему слой газогидратов в Байкале нестабилен? Почему метан там просачивается на поверхность дна, в то время как в морях и океанах газогидратный слой, как правило, устойчив?

#### БАЙКАЛ – УНИКАЛЕН ВО ВСЕМ

Предположительно существует несколько причин нестабильности газогидратов. Это — быстрое накопление осадочной толщи, тектоническое поднятие земной коры, миграция флюидов, локальное растяжение коры, оползневые явления. Например, когда осадочная толща быстро нарастает, подошва зоны стабильности гидратов смещается вверх, а газогидраты в нижней части слоя разрушаются. В результате происходит накопление свободного газа.

Район дельты Селенги — участок самого значительного поступления твердого стока на Байкале и, соответственно, самого быстрого накопления осадков. Когда активизиру-

## ИЗВЕСТИЯ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ОТДЕЛА ИМПЕРАТОРСКОГО Русского

ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА,

под редакциею правителя дѣлъ.

ТОМЪ XXIII.

№ 4.

СОДЕРЖАНІЕ:

Стр.	Стр.
В. А. Обручевъ. Наши свѣдѣнія объ образованіи ангарскаго и байкальскаго льда (Unsere Kenntnisse über d. Bildung der Eiskecke d. Angara u. d. Baikalsees v. W. Obrutschef)	1
Смисъ. Ю. Д. Тально-Гринцевичъ. Задачи современной антропологии (Die Aufgaben d. heutigen anthropologie v. I. Talke-Grinzewitsch)	53
Я. П. Прейль. Къ вопросу о Терап мѣтанъ въ Сибири (Zur Frage über das Verschwinden d. Teraп methane in Sibirien v. J. Prein)	42
Дѣйствія В. С. Отдѣла (См. на оборотѣ).	
(Sitzungsberichte d. Ost-Sibirischen Section v. 20 mai d. 1891 7. November d. 1891 j.) (стр. 17—36)	

**История изучения выходов газа на Байкале** насчитывает около полутора столетий. Выходы газа в Байкале отмечали уже первые побывавшие там путешественники. В 1868 году для изучения явления была организована специальная экспедиция. В начале XX века академик В. Обручев писал: «Еще задолго до полного взламывания льда появляются на Байкале голые места, носящие у местных жителей характерное название пропарин и образующиеся, по их мнению, вследствие действия теплых подводных ключей ... сейчас же после покрытия озера льдом, когда лед еще очень тонок, на местах будущих пропарин подо льдом собираются большие пузыри воздуха (газа).



В зимнее время пузырьки газа, выделяющегося над донными источниками, вмерзают в лед. Фото Н. Гранина

Скопления метана, запасенного в виде гидратов, несут человечеству угрозу климатических и геологических катастроф. Но они же — потенциальный энергетический источник для будущего человечества



Газогидраты в грунтовых пробах выглядят как непрозрачные включения двух типов: крупные массивные комки с тонкими трещинами, заполненными осадком, и многочисленные более мелкие включения плитчатой формы, размером до 2 см. По данным газохроматографии, в составе газогидратов 99 % метана. Фото Я. Клеркса

ется один из разломов, достигающих основания зоны стабильности газогидратов, то осадочная «пробка» над областью скопления жидкости и газа может сместиться ниже границы BSR и флюиды могут устремиться вверх по разлому к поверхности дна. Теплые флюиды, поднимающиеся из-под нижней границы зоны стабильности гидратов, нарушают их устойчивость, и граница в результате перемещается на меньшую глубину.

Движение флюидов по каналам разломов, так же как и их направленная миграция, характерная для обстановок сжатия, оказывает дестабилизирующее влияние на газогидраты. Хотя в целом в Байкальской впадине преобладает напряжение растяжения, на локальных участках имеются признаки сжатия осадочной толщи. Это может приводить к дегидратации с высвобождением воды и формированию флюидных потоков. В условиях быстрого осадконакопления в районе дельты Селенги флюиды движутся в направлении минимального сжатия и накапливаются под подошвой зоны стабильности гидратов. Нижняя граница стабильности благодаря действию более высокой температуры смещается вверх. В конце концов в ней появляются нарушенные участки. В результате метаносодержащие флюиды поднимаются по

разломам в тектонически-активном районе Байкала и выходят на поверхность дна озера.

Эта необычная последовательность процессов, при которой метан накапливается в форме гидратов и высвобождается при нарушении их устойчивости с образованием грязевых вулканов, как и сам факт существования метановых газогидратов в условиях пресноводного водоема, — еще одно очередное свидетельство уникальности Байкала. Но главное не это. Вспомним: метан в форме гидратов, это потенциальное топливо будущего, устойчив только при низких температурах и высоком давлении. Поэтому их изучение в теплых и глубоких морях крайне затруднительно: гидраты просто «не доживают» до поверхности. Такой проблемы в холодном и глубоком озере не существует, а зимний, закованный в лед Байкал — удобная рабочая площадка для исследований. Подтверждая свой статус международной природной лаборатории, пресноводный «океан» Байкал радушно приветчает на своих берегах ученых из Санкт-Петербурга и Японии, из маленькой континентальной Бельгии и с далеких берегов теплого Индийского «собрата»...

### О газах, выделяющихся со дна Байкала<sup>\*)</sup>.

Журнал Минер. Соборного Отдела Императорского Русского Географического Общества 1861 года, декабрь 1861 г.

7-го Ноября А. М. Ломоносов вместе с А. Л. Чекановским выехали из Иркутска и на тот-же день прибыли из с. Листвяничное, находящегося на западном берегу Байкала, из 60 верстах от Иркутска и служащее пристанью для пароходов. Цель поездки состояла из следующего:

- 1) Узнать, где происходят главные выделения, отобразить сведения у местных жителей.
- 2) Исследовать качественно выделенные газы у с. Листвяничного и достигнуть затѣм острова Ольхон.
- 3) Добыть экземпляры байкальской губки *Spongia байкаленсис* и других растений, если таковые существуют, для определения чистых остаточных частей воды Байкала, которая выводится из весьма малых количеств.
- 4) Уехать от селения близ Листвяничного, недалеко от устья выделенных газов справедливо, такъ какъ из с. Иркутскъ слухи эти были слишком преувеличены и возбуждали опасение за повторение землетрясеній, бывшихъ 30 и 31 декабря 1861 г.

Г. Чекановскій задала исследованію геогностическаго строения окрестностей у с. Листвяничного.

<sup>\*)</sup> Перепечатано из: «Известия Императорскаго Русскаго Географическаго Общества». Томъ V, № 2, стр. 67—73, с. Петербурга, 1861 года. *Прим. ред.*

*Если лед пробить ловким ударом пещни и подвести к отверстию зажженную спичку, то из отверстия вырывается яркое пламя, поднимающееся иногда на высоту сажени, смотря по величине пузыря».* Особое внимание этому явлению уделялось в 20—30-е годы XX века, когда Байкал считали перспективным нефтеносным районом. Эти надежды базировались на том, что в составе газов из донных источников были обнаружены высокое содержание метана. По многим признакам, интенсивность разгрузки газов в озере значительно снизилась за последние полвека.

Редакция благодарит Олега Михайловича Хлыстова, руководителя группы «Геология озера Байкал» (Лимнологический институт СО РАН) за помощь в подготовке материала