

*Природные газовые  
гидраты в осадочных  
бассейнах мира*

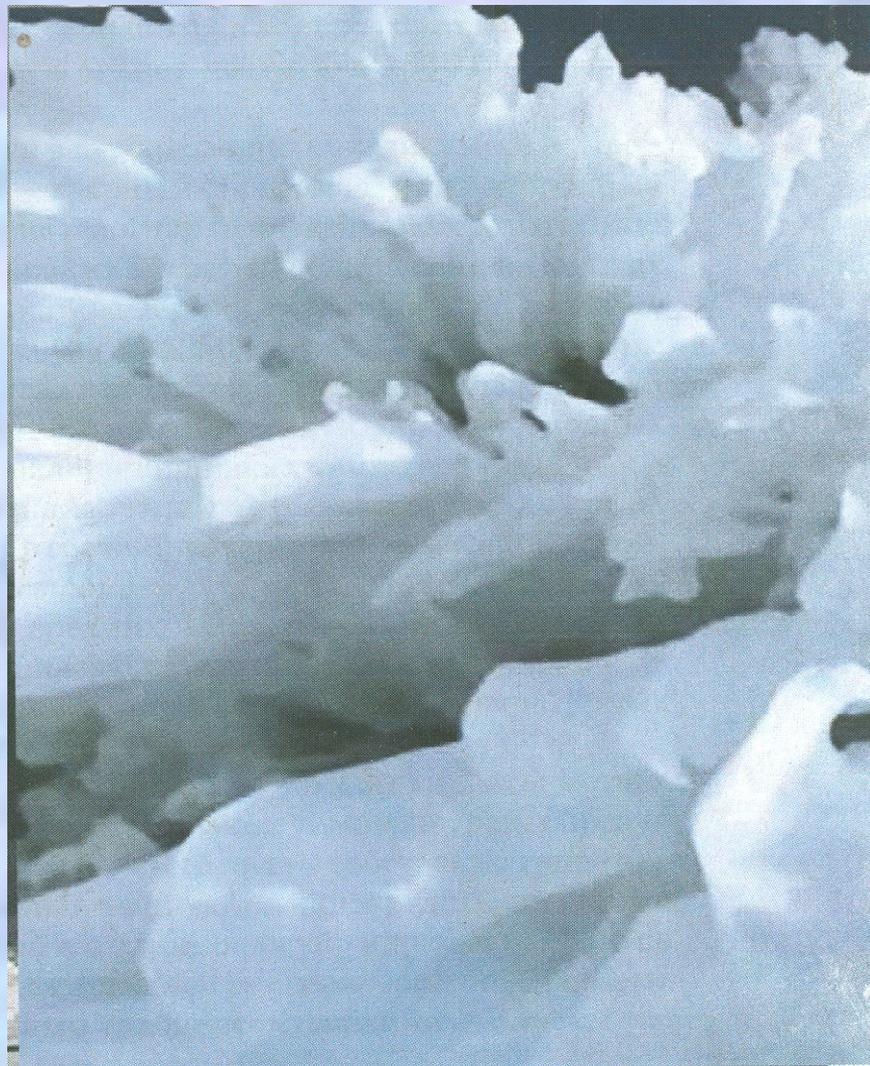
*Отбор образцов приповерхностных газогидратов во время ледовой экспедиции на Южном Байкале (фото Н. Гранина)*



*Кристаллы газовых гидратов состоят из молекул газа, впаянных в каркас из молекул воды*

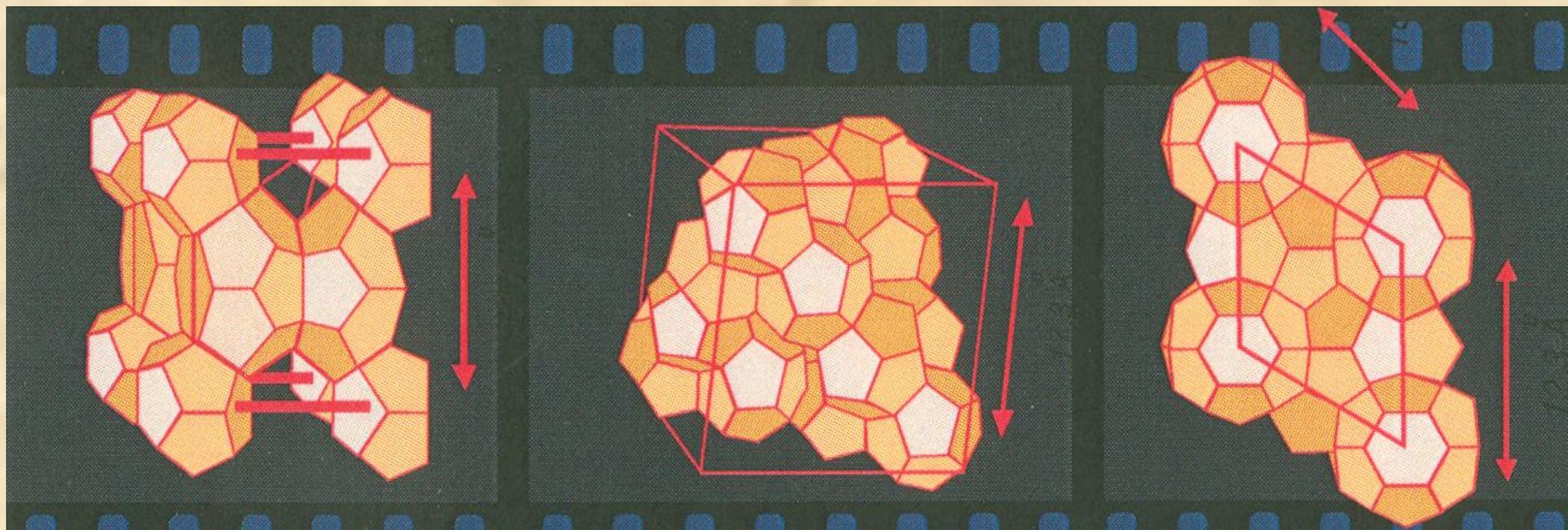


Кристаллы газовых гидратов состоят из молекул газа, впаянных в каркас из молекул воды. Фото О. Хлыстова



*Озеро Байкал; Фото О. Хлыстова*

*Гидраты метана – это кристаллические соединения, в которых кристаллическая решётка воды, характерная для льда, расширена и содержит полости, заполненные молекулами газов*



*Гидраты образуются там, где вода и метан оказываются рядом при низких температурах и повышенных давлениях*

*Общая формула гидрата  $M \cdot nH_2O$ , где  $M$  – молекула газа,  $n = 6 – 17$  в зависимости от состава газа и  $P$ - $T$  условий.*

*46 молекул воды могут удерживать до 8 молекул метана  $CH_4$  ( $CH_4 \cdot 5.75 H_2O$ )*

*или*

*до 6 молекул изобутана  $C_2H_6$  ( $C_2H_6 \cdot 7.66 H_2O$ )*

*При полном заполнении ячеек метаном ( $CH_4 \cdot 5.75 H_2O$ ) в  $1 м^3$  гидрата будет содержаться около  $172 м^3$  метана (при стандартных условиях).*

*Но гидрат может образовываться даже при заполнении всего лишь трети ячеек и тогда  $1 м^3$  такого гидрата будет содержать около  $60 м^3$  метана (при н.у.).*

*Содержание небольшой примеси газогидратов может менять физические свойства пород. Так, таяние льда, содержащего всего 1 – 2% газогидратов отличается по свойствам от таяния льда без гидратов. Оно сопровождается шипением, растрескиванием и пузырением поверхности, а также растрескиванием образца льда. .*

### *Примеры:*

*Ядра ледяных комет состоят на 95 – 98% из льда и на 2 – 5% из гидрата метана.*

*Ямбург: образцы пород с глубин 70 – 120 м при оттаивании выделяли 0.22 см<sup>3</sup> газа / г породы.*

*Этот газ в основном – газогидратный, так как при льдонасыщенности пор 90 – 98% свободного газа в породах должно бы содержаться очень мало.*

*Теплофизические свойства газогидратов в среднем близки к свойствам льда за исключением теплопроводности, которая для метановых гидратов составляет 0.45-0.51*

*Вт/м°К,*

*тогда как для воды равна 0.565 Вт/м°К, а для льда - 2.35 Вт/м°К*

*Тем самым, теплопроводность чистых гидратов на 20% ниже, чем теплопроводность воды и на 80% ниже, чем у льда.*

*Большой интерес к природе формирования скоплений газовых гидратов обусловлен в основном следующими причинами:*

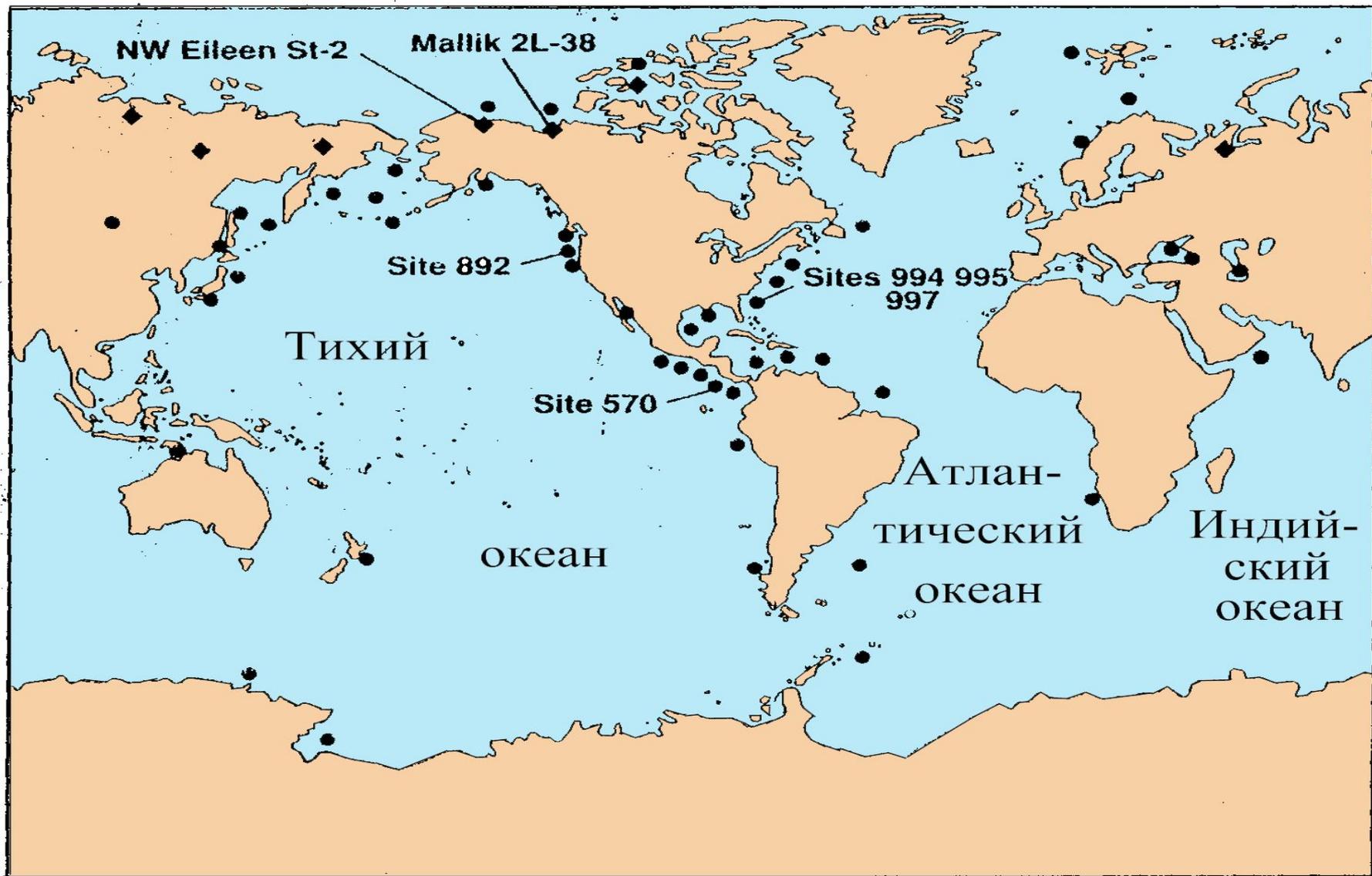
- 1) Гидратные залежи рассматриваются как возможный существенный источник энергетических ресурсов в будущем**
- 2) Газогидраты играют важную роль в механизме формирования подводных оползней**
- 3) Не исключён существенный вклад процессов разложения газогидратов в глобальное потепление климата (парниковый эффект (Carcione et al., 2005))**

*Гидраты широко распространены в природе. Объем газа, связанного в них, оценивается от  $10^{13}$  до  $4 \cdot 10^{14}$  м<sup>3</sup> на суше и от  $3 \cdot 10^{15}$  до  $4 \cdot 10^{16}$  (и даже  $8 \cdot 10^{18}$ ) – в морях и океанах (Collett, 2002)*

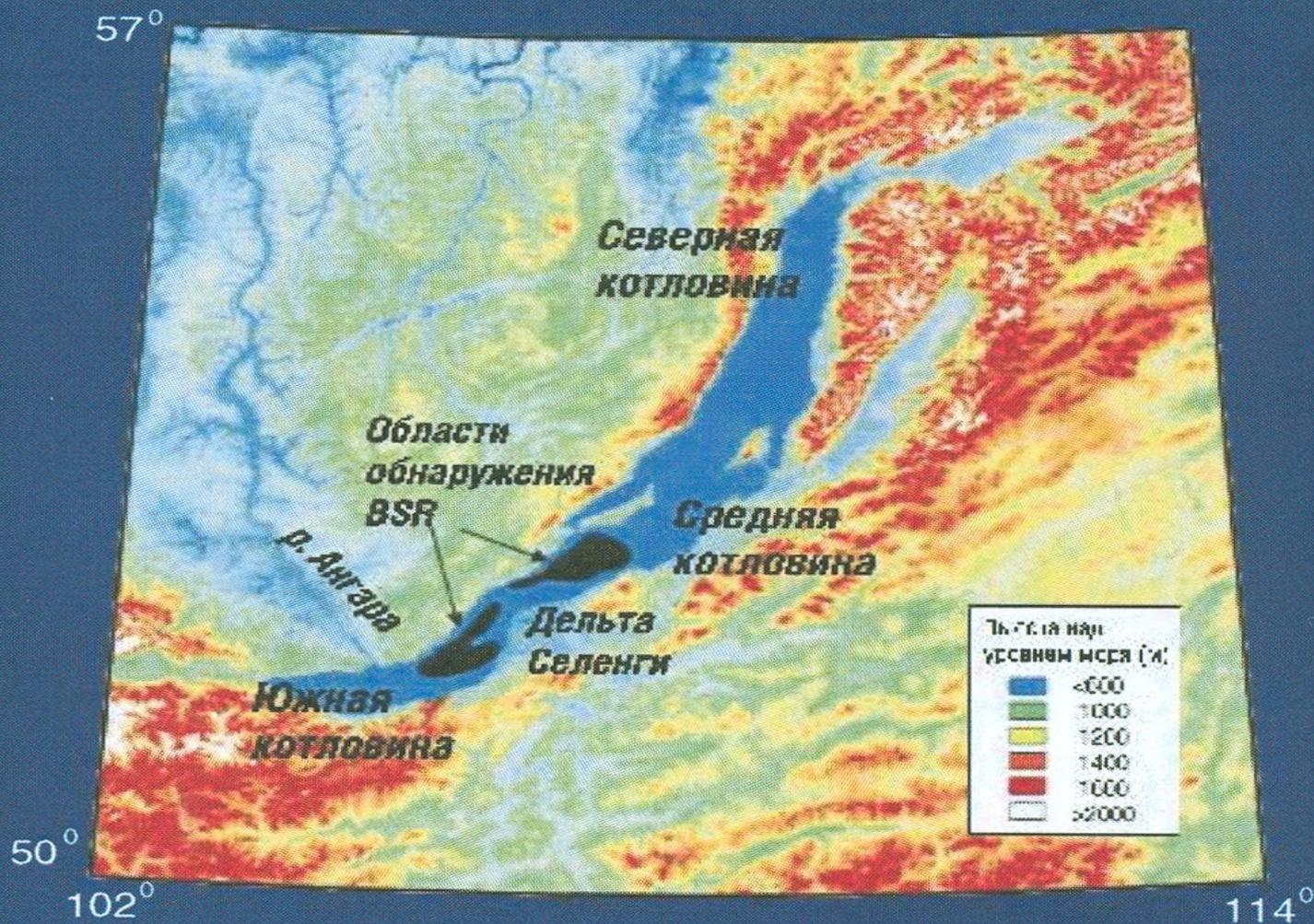
Газогидраты суши (в зонах пермафроста)		Газогидраты океана	
Количество газа (м <sup>3</sup> )	Ссылка	Количество газа (м <sup>3</sup> )	Ссылка
$1,4 \cdot 10^{13}$	Meyer, 1981	$3,1 \cdot 10^{15}$	Meyer, 1981
$3,1 \cdot 10^{13}$	Mclver, 1981	$5-25 \cdot 10^{15}$	Trofimuk et al., 1977
$5,7 \cdot 10^{13}$	Trofimuk et al., 1977	$2 \cdot 10^{16}$	Kvenvolden, 1988
$7,4 \cdot 10^{14}$	MakDonald, 1990	$2,1 \cdot 10^{16}$	MakDonald, 1990
$3,4 \cdot 10^{16}$	Dobrynin et al., 1981	$4 \cdot 10^{16}$	Kvenvolden, Claypool 1988

**В Арктике скопления газовых гидратов встречаются в пределах зон распространения вечной мерзлоты на глубинах от 130 до 2000 м.**

**В прибрежных районах континентальных окраин скопления газовых гидратов обнаруживаются по наличию аномального сейсмического отражающего горизонта (BSR – bottom simulation reflector) на глубинах от 100 до 1000 м под дном моря**



**Положение доказанных и предполагаемых (по ДСО (BSR)) накоплений газогидратов в океанических отложениях внешних зон континентальных окраин (кружки) и в зонах вечной мерзлоты (ромбы) (Collet, 2002).**



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

**Районы озера Байкал, где присутствие газогидратов предполагается по наличию сейсмического горизонта BSR. (Клеркс и др., 2004).**

# Оценка объёма газа, содержащегося в газогидратах, по данным каротажа в скважинах (Collet, 2002).

скважина	Интервал глубин слоёв с газ.-гидрат. (м)	Толщина слоя с газогидратами (м)	Средняя пористость Пород (%)	Средняя насыщенность Газогидратами (%)	Объём газа В газогидратах (м <sup>3</sup> / км <sup>2</sup> )
<b>Глубоководное бурение ((DSDP; океан)</b>					
<b>Скв. 994</b>	<b>212.0-428.8</b>	<b>216.8</b>	<b>57.0</b>	<b>3.3</b>	<b>669 970 673</b>
<b>Скв. 995</b>	<b>193.0-450.0</b>	<b>257.0</b>	<b>58.0</b>	<b>5.2</b>	<b>1 267 941 673</b>
<b>Скв. 997</b>	<b>186.4-450.9</b>	<b>264.5</b>	<b>58.1</b>	<b>5.8</b>	<b>1 449 746 073</b>
<b>Скв. 889</b>	<b>127.6-228.4</b>	<b>100.8</b>	<b>51.8</b>	<b>5.4</b>	<b>466 635 705</b>
<b>Нанкай жёлоб (океан)</b>					
<b>МІТІ скв.</b>	<b>207-265</b>	<b>16</b>	<b>36</b>	<b>80</b>	<b>755 712 000</b>
<b>Северное побережье Аляски (скв. N-W Eileen State 2) (суша)</b>					
<b>Слой С</b>	<b>651.5-680.5</b>	<b>29.0</b>	<b>35.6</b>	<b>60.9</b>	<b>1 030 904 796</b>
<b>Слой D</b>	<b>602.7-609.4</b>	<b>6.7</b>	<b>35.8</b>	<b>33.9</b>	<b>133 382 462</b>
<b>Слой E</b>	<b>564.0-580.8</b>	<b>16.8</b>	<b>38.6</b>	<b>32.6</b>	<b>346 928 811</b>
<b>суммарное</b>					<b>1 511 216 069</b>
<b>Дельта р. Маккензи (Канада) (суша)</b>					
<b>Mallik 21-38</b>	<b>888.8-1101.1</b>	<b>212.3</b>	<b>31.0</b>	<b>44.0</b>	<b>4 749 066 080</b>

**Глубина кровли и подошвы области устойчивого существования метановых газогидратов определяется по точкам пересечения температурных профилей осадочной толщи с фазовой кривой, описывающей равновесие метанового газогидрата с пресной водой и льдом (Истомин, Якушев, 1992):**

$$\ln P = A - B \times T$$

**P – поровое давление (в МПа), которое предполагается равным гидростатическому, T - температура (в °К) :**

$$A = 8.968, 29.112, 36.32, 38.569 \text{ и } B = 2196.62, 7694.3, 9735.05, 10378.58 \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

**для температурных интервалов:**

**260 < T < 273 °К, 272 < T < 283 °К, 282 < T < 291 °К,  
290 < T < 302°К,  
соответственно.**

Содержание солей смещает равновесную кривую «метан-водный раствор NaCl» в сторону низких температур (Истомин, Якушев, 1992):

$$\ln(P/P_0) = (C / T) + D - 128.65 \cdot X + 40.28 \cdot X^2 - 138.49 \cdot \ln(1 - X)$$

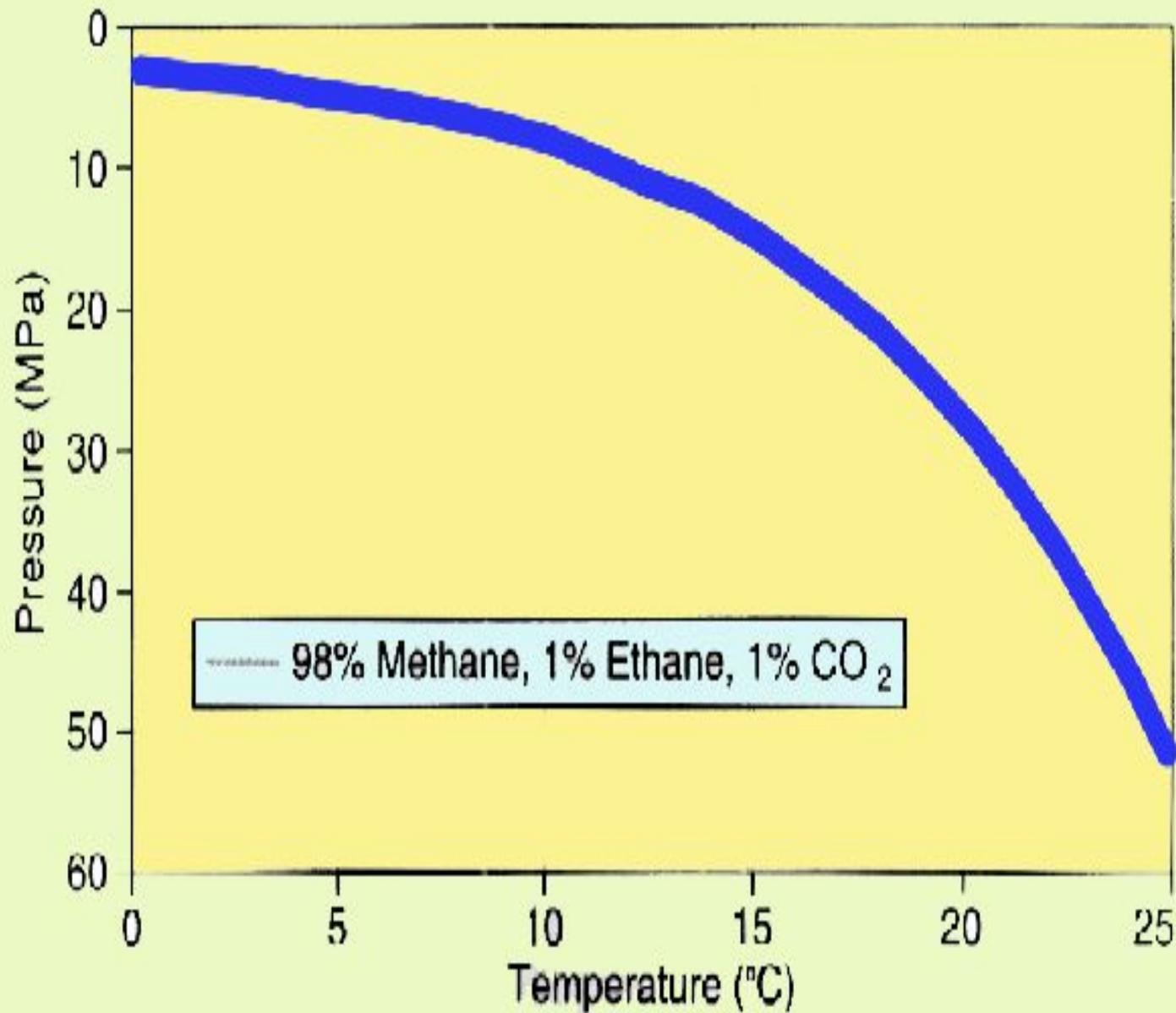
где  $X$  – молярная доля NaCl в растворе (для морской воды с 35 г NaCl в 1000 г H<sub>2</sub>O имеем:

$$X = n(\text{NaCl}) / n(\text{H}_2\text{O}) = (35/58.5) / (1000/18) = 0.01077),$$

$P$  – поровое давление в МПа ( $P = P_0 + \rho_w \cdot g \cdot z \approx P_0 + 10 \times z(\text{км})$  (МПа)),  $P_0 = 0.01013$  МПа, параметры

$C = -8160.43$  и  $D = 55.1103$  характеризуют равновесие метан-гидрат-вода в отсутствии NaCl.

$T$  – температура в °К



**Кривая  
фазового  
равновесия  
морской  
воды (3.5%  
соли) с  
газогидра-  
том и газом  
98% метана,  
1% этана  
и 1% CO<sub>2</sub>  
(Jackson,  
2004).**

$$P(\text{МПа}) = P_0 + 10 \cdot z(\text{км})$$

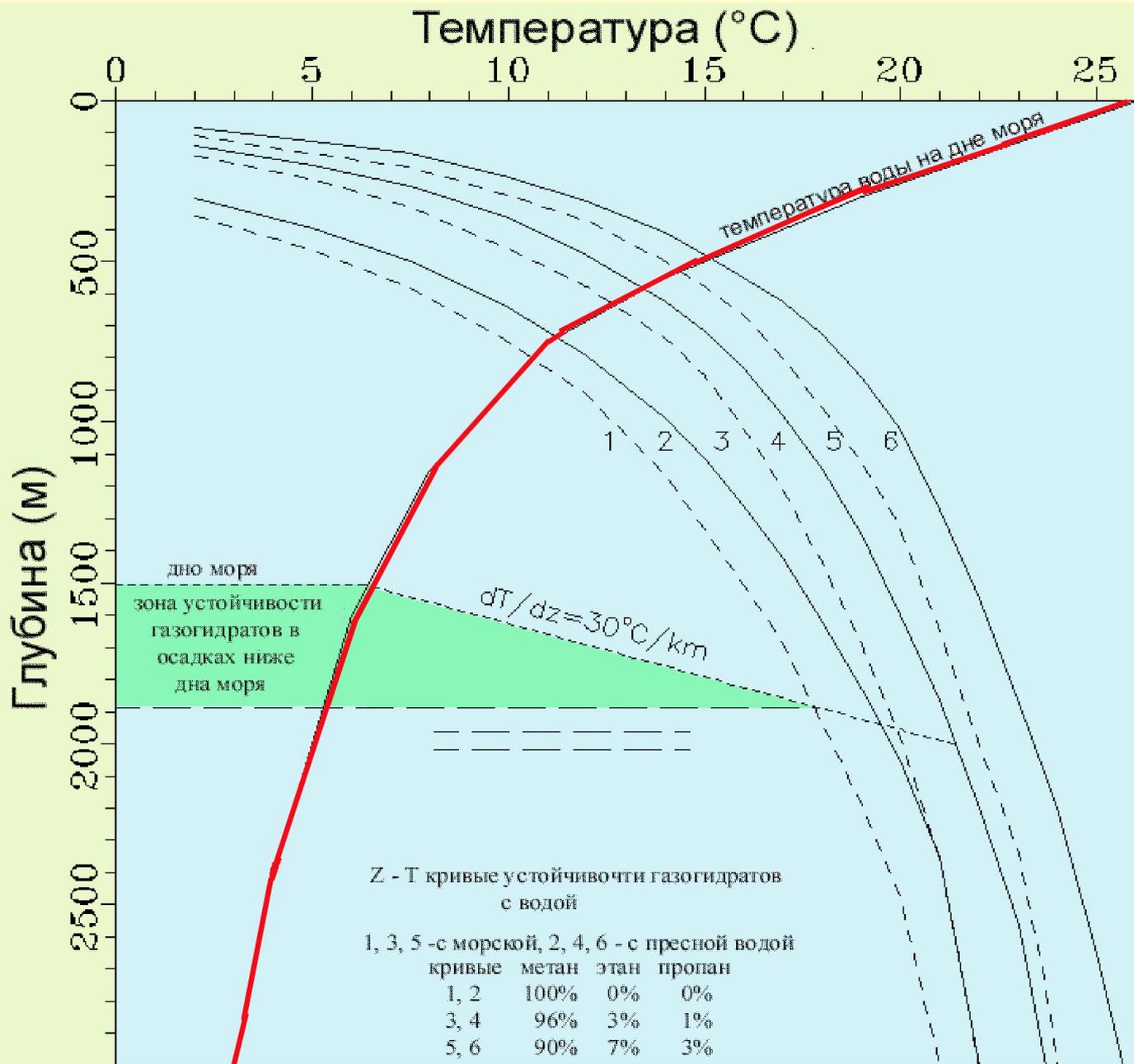
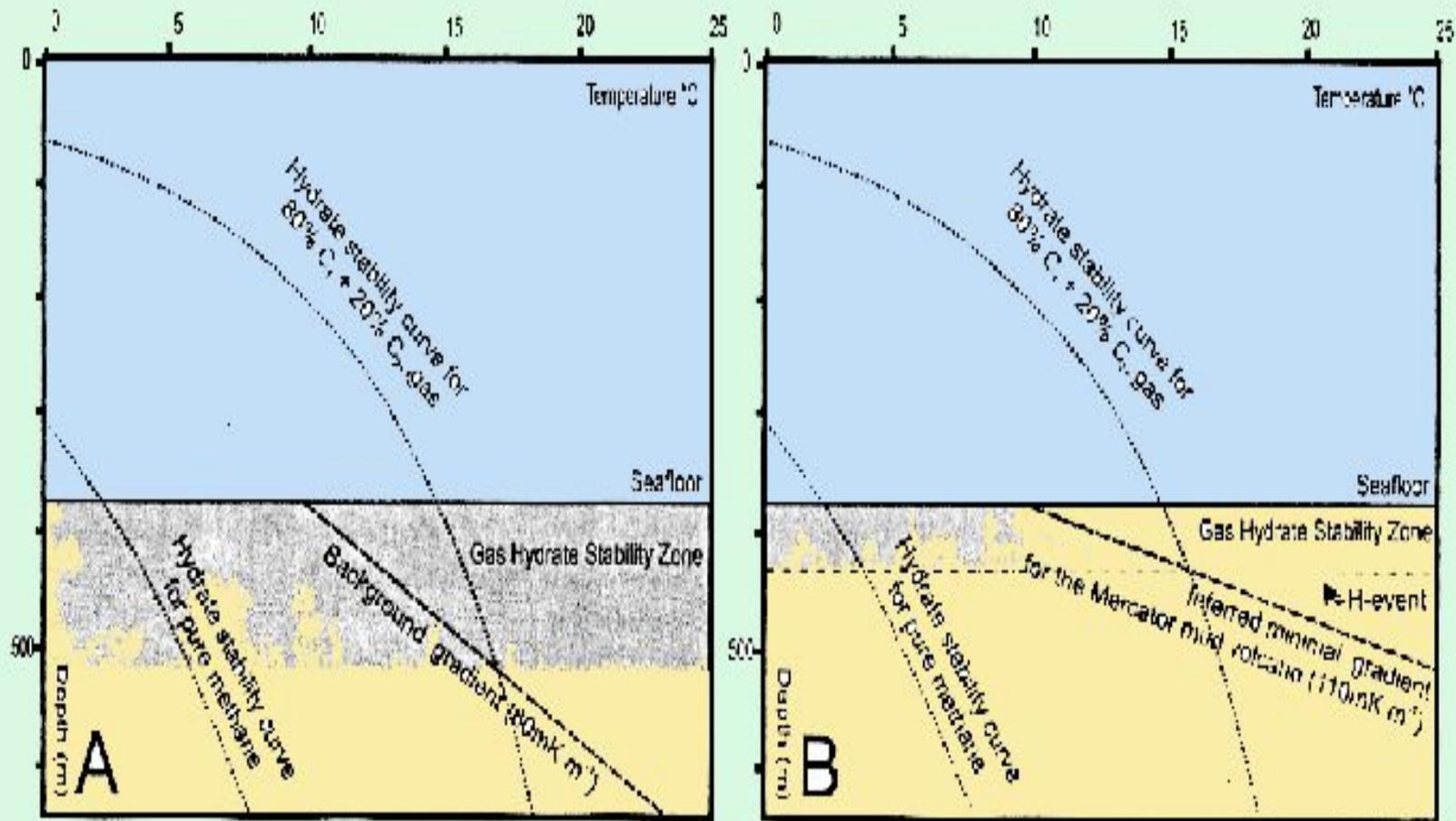


Диаграмма устойчивости газогидратов в осадках в поле « T – Z » при заполнении пор морской или пресной водой  
 (по (Laberg et al., 1998) с изменениями)



**Кривые равновесия для газогидратов с 20% C<sub>1</sub>+ и для чистого метана. Зоны устойчивости для грязевого вулкана Меркатор (110°C/км; В) и для его флангов (60°C/км; А) (шельф Марокко; Depreiter et al., 2005).**

**Из диаграмм видно, что условия устойчивого существования газогидратов в системе «газогидраты – поровая вода» по температуре и давлению зависят :**

**1) от содержания метана, этана, пропана,  $H_2S$  и  $CO_2$  в газе**

**(5 – 10% примесь этана и пропана в метане сдвигает температуры равновесия с газогидратом на 5-10°C)**

**2) - от солёности воды.**

**(переход от пресной воды к морской понижает температуры равновесия примерно на 1.5°C)**

**(Hesse and Harrison, 1981; Weaver and Stewart, 1982; Laberg et al., 1998; Jackson, 2004; Depreiter et al., 2005)**

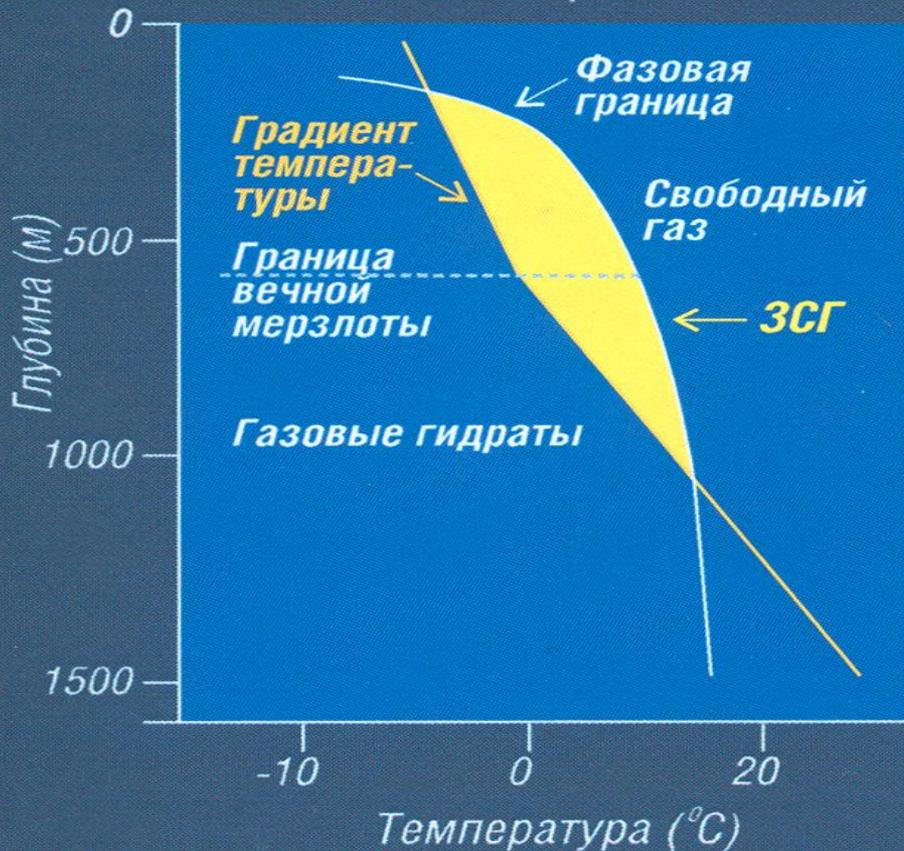
**Смешанные гидраты  
(метан + этан + сероводород)  
могут формироваться при более низких  
давлениях (или при более высоких  
температурах),  
чем чисто метановые.**

**Образующиеся газогидраты могут забирать  
лёгкие компоненты из нефти, увеличивая  
плотность последней (Hunt, 1996).**

*Примеры численных расчётов  
глубин зоны устойчивого  
существования метановых  
газогидратов на континентах  
и в океанических условиях.*

**Глубины зоны устойчивого существования газовых гидратов определяют зону возможного существования этих образований по P-T условиям, однако, не гарантируют их наличие в породе и не определяют их объём.**

### Вечная мерзлота



### Глубоководная зона

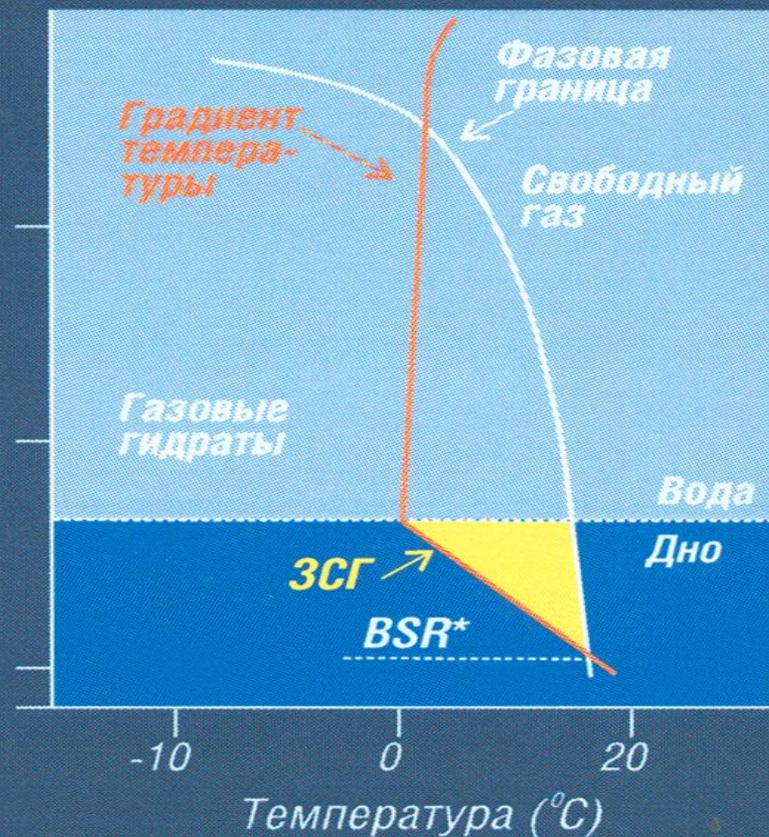
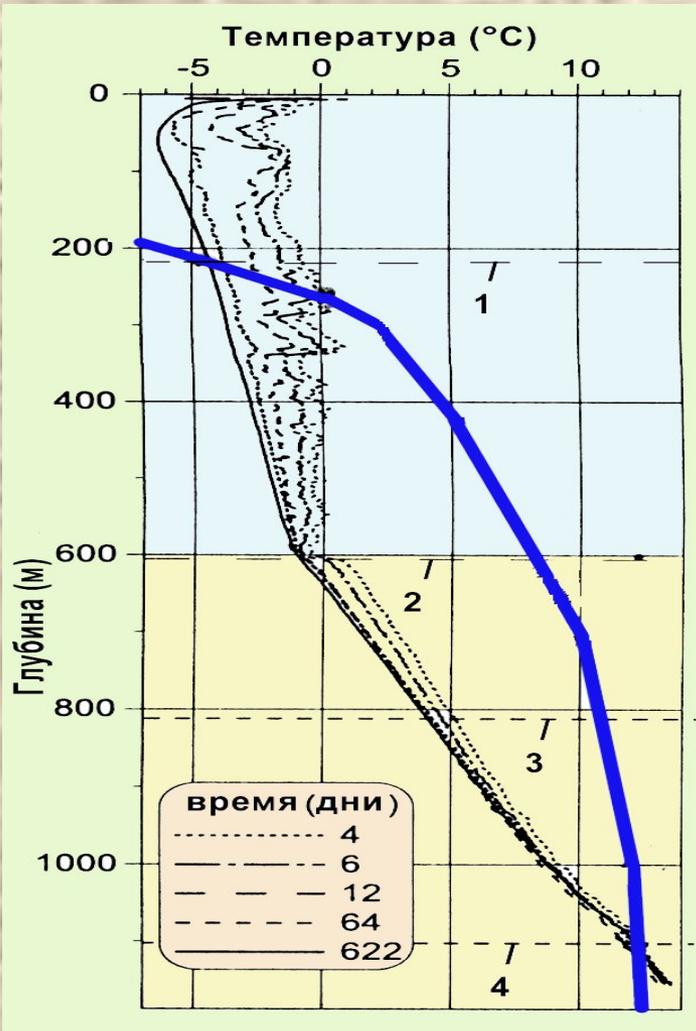


Диаграмма РТ-условий зоны стабильности газовых гидратов. Газогидраты образуются в осадках в пределах зоны, где они могут находиться в состоянии термодинамической устойчивости, — зоны стабильности гидратов (ЗСГ)

**Примеры определения глубин зоны устойчивого существования газогидратов в зонах вечной мерзлоты на суше и в глубоководных условиях озера Байкал (Клеркс и др., 2004).**

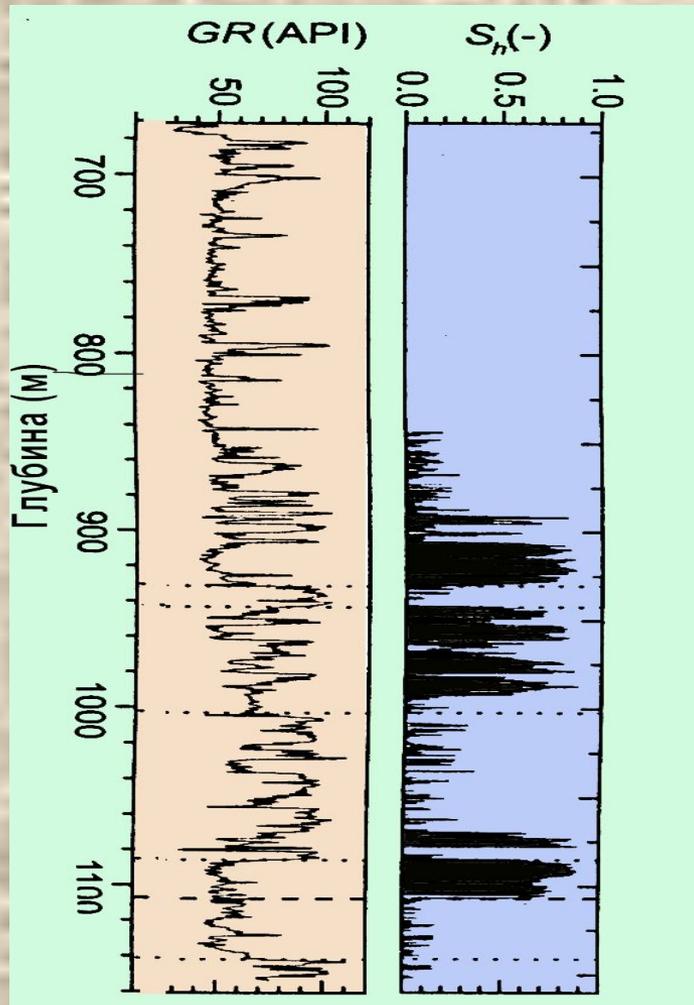
**Площадь Малик (скв. Malik 2L-38), побережье моря Бофорта, устье реки Мак-Кензи (Henninges et al., 2005). Газогидраты – в песчаных прослоях, разделённых слоями глинистых сланцев олигоцен-ранне-миоценового возраста.**



**Распределения температур с глубиной, измеренные после прекращения бурения (время в днях) и кривая устойчивости метановых газогидратов с пресной водой. 1, 4 - кровля и подошва зоны устойчивости газовых гидратов; 2 - подошва зоны пермафроста; 3 - кровля и подошва зоны обнаружения слоёв с газогидратами.**

**Макс. насыщенность г-г достигала 90% при ср. пористости 0.30**

## Площадь Малик, устье реки Мак-Кензи



Осадочные слои глинистых сланцев (без газогидратов), перемежаются со слоями песчаников толщиной от 1 до – 23 м, содержащих газогидраты с насыщенностью от 25- 65% (макс. 89%) в интервале глубин от 800м (уровень 3) до 1100 м (уровень 4 на рис. 1). Основание зоны вечномёрзлых пород располагается на глубине 600 м (уровень 2 на рис.1), а кровля и подошва зоны устойчивого существования газогидратов приходятся на глубины 220 и 1100 м (Henninges et al., 2005).

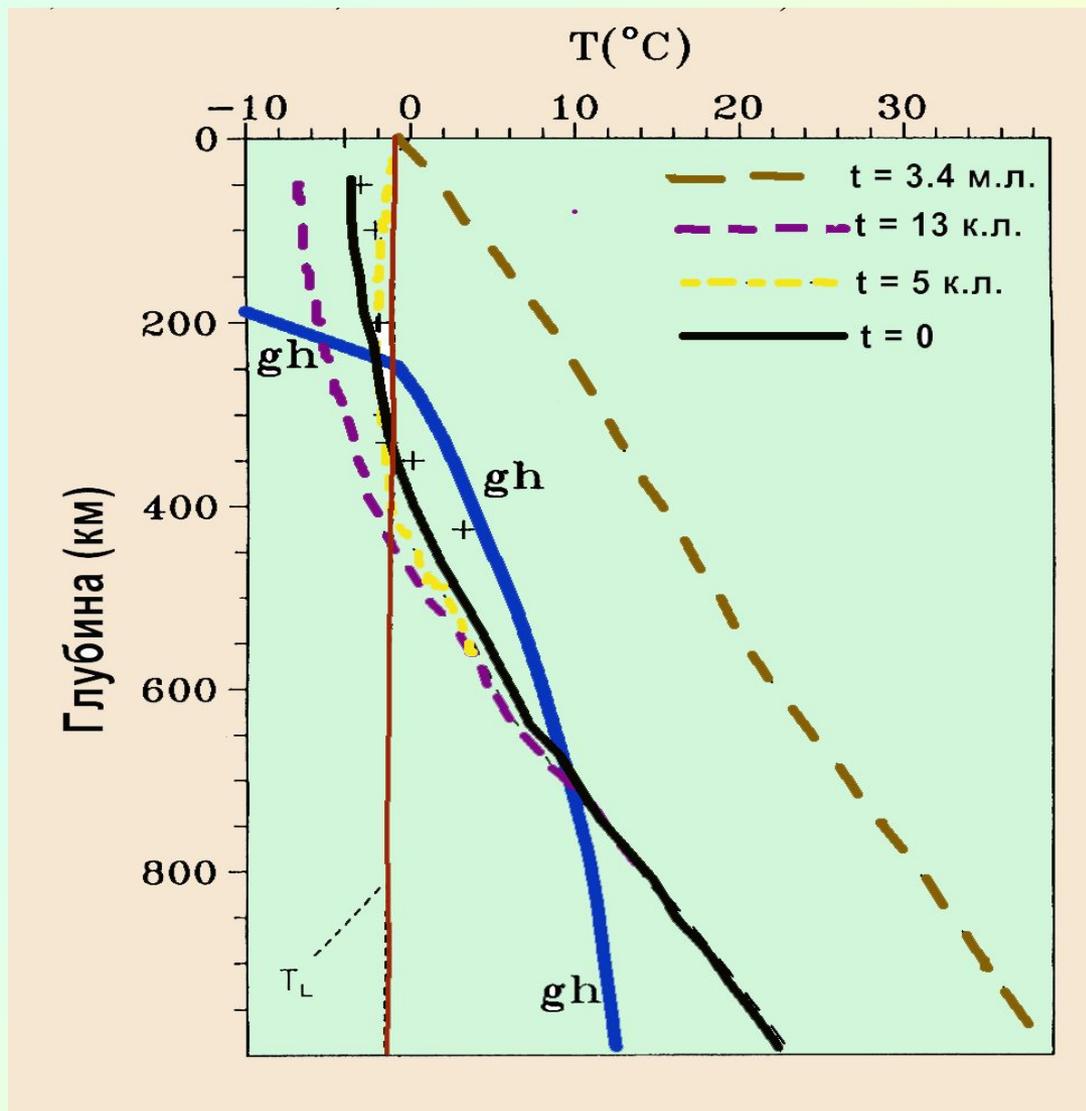
# Распределение температуры с глубиной и положение зоны устойчивого существования метановых газогидратов

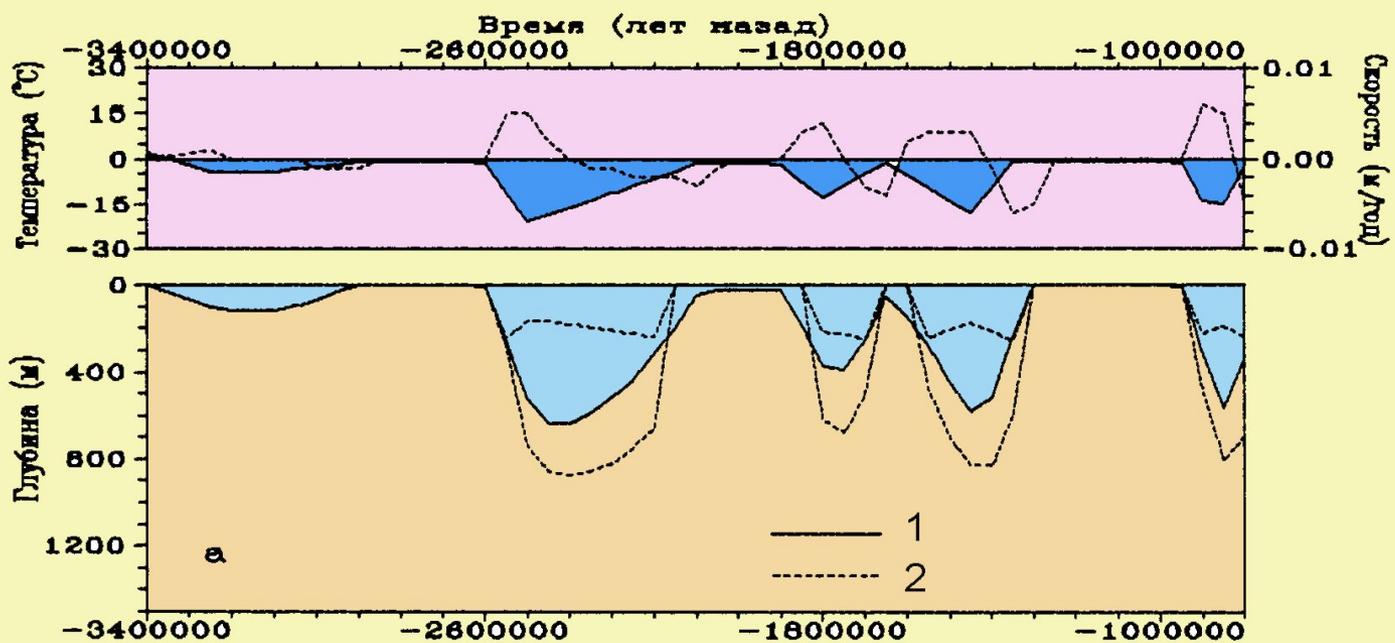
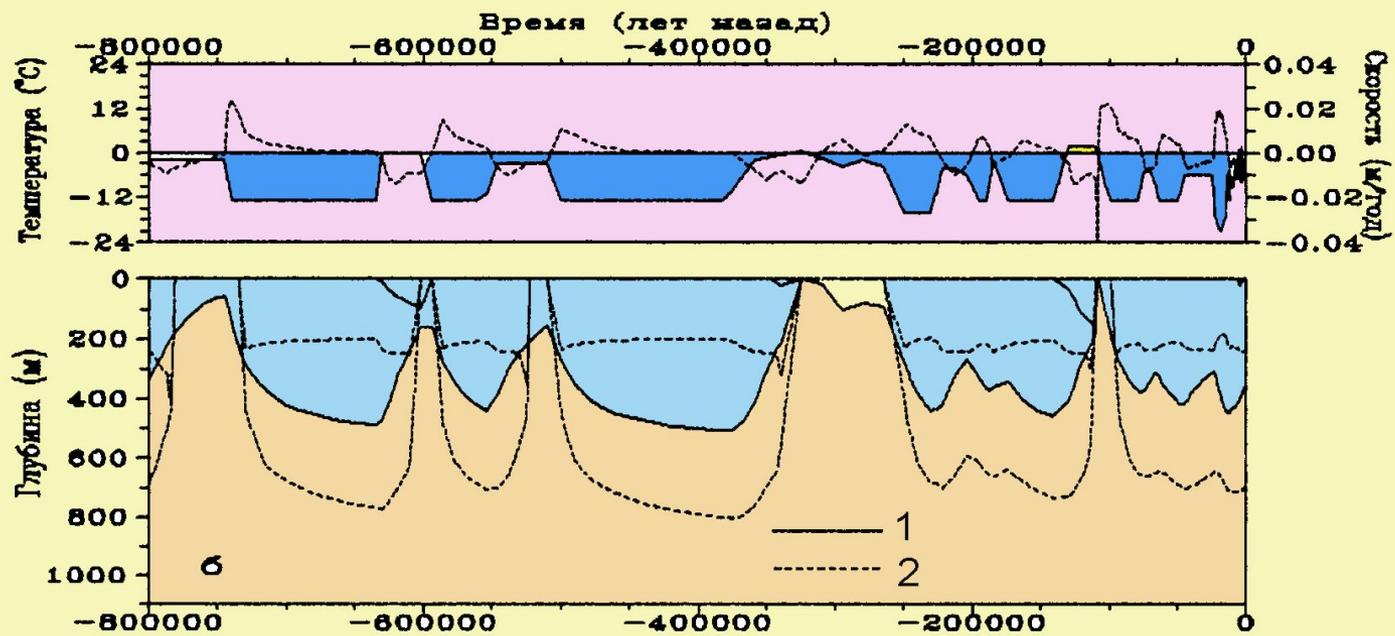
Уренгойская площадь  
Западно-Сибирского  
бассейна, скв. 411

Показаны профили температур 3.4 млн. лет назад, 13 000 и 5 000 лет назад, а также  $T(z)$  в современном разрезе.

gh – кривая устойчивости газогидратов.

$T_L$  – температура ликвидуса поровой жидкости

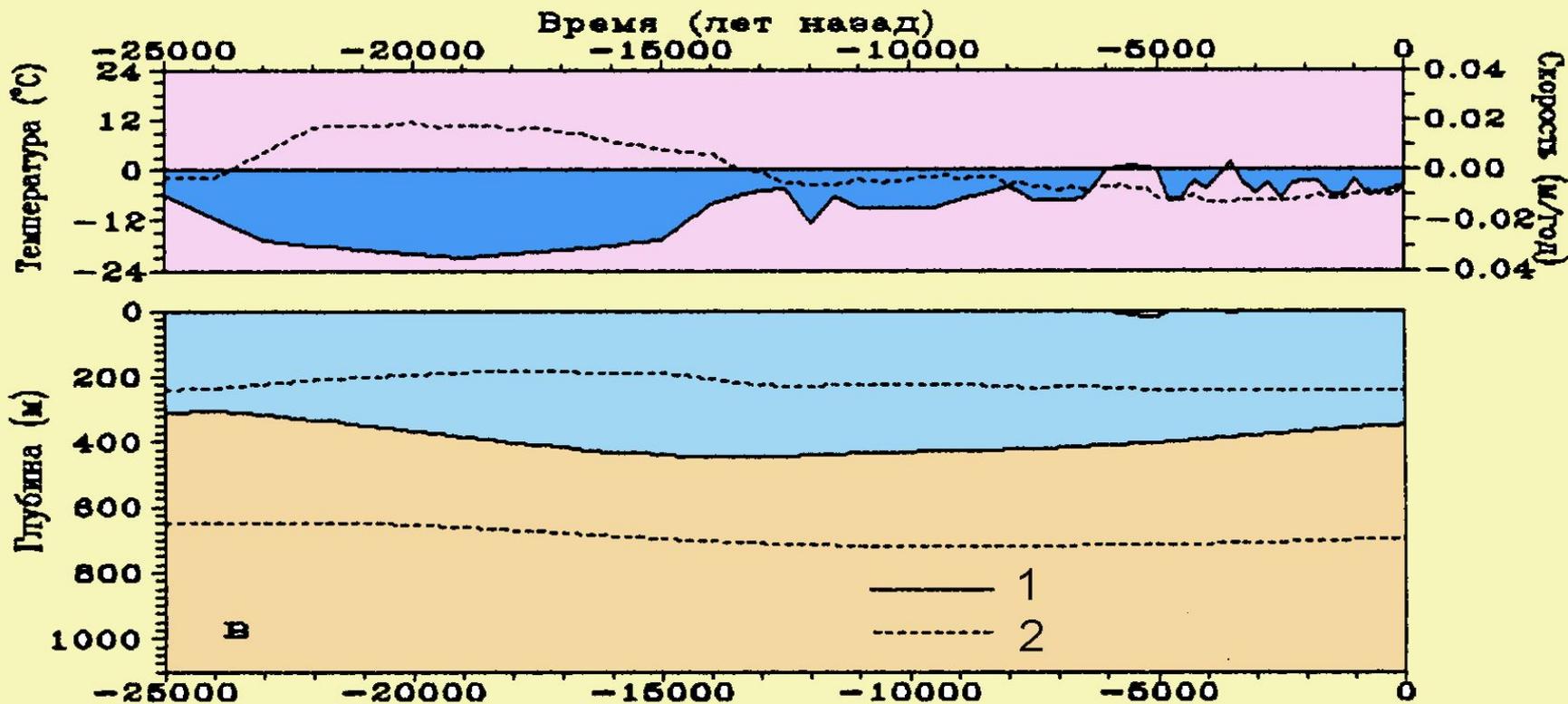




Изменение мощности пермафроста и глубин зон устойчивости метановых газогидратов в ответ на резкие колебания климата в последние 3 млн. лет. (результаты моделирования; скв. 411, Уренгойская площадь, Западно-Сибирский бассейн).

**Моделирование демонстрирует, что процессы формирования и дегградации зон благоприятных для устойчивого существования метановых газогидратов тесно коррелируют с динамикой существования зон вечномерзлых пород.**

**В истории изменения климата за последние 3.4 млн. лет лет выделяются по крайней мере 9 периодов с образованием мощных зон благоприятных для устойчивого существования метановых газогидратов на глубинах от 200-300 м до 400-800 м и примерно столько же периодов с дегградацией этих зон.**

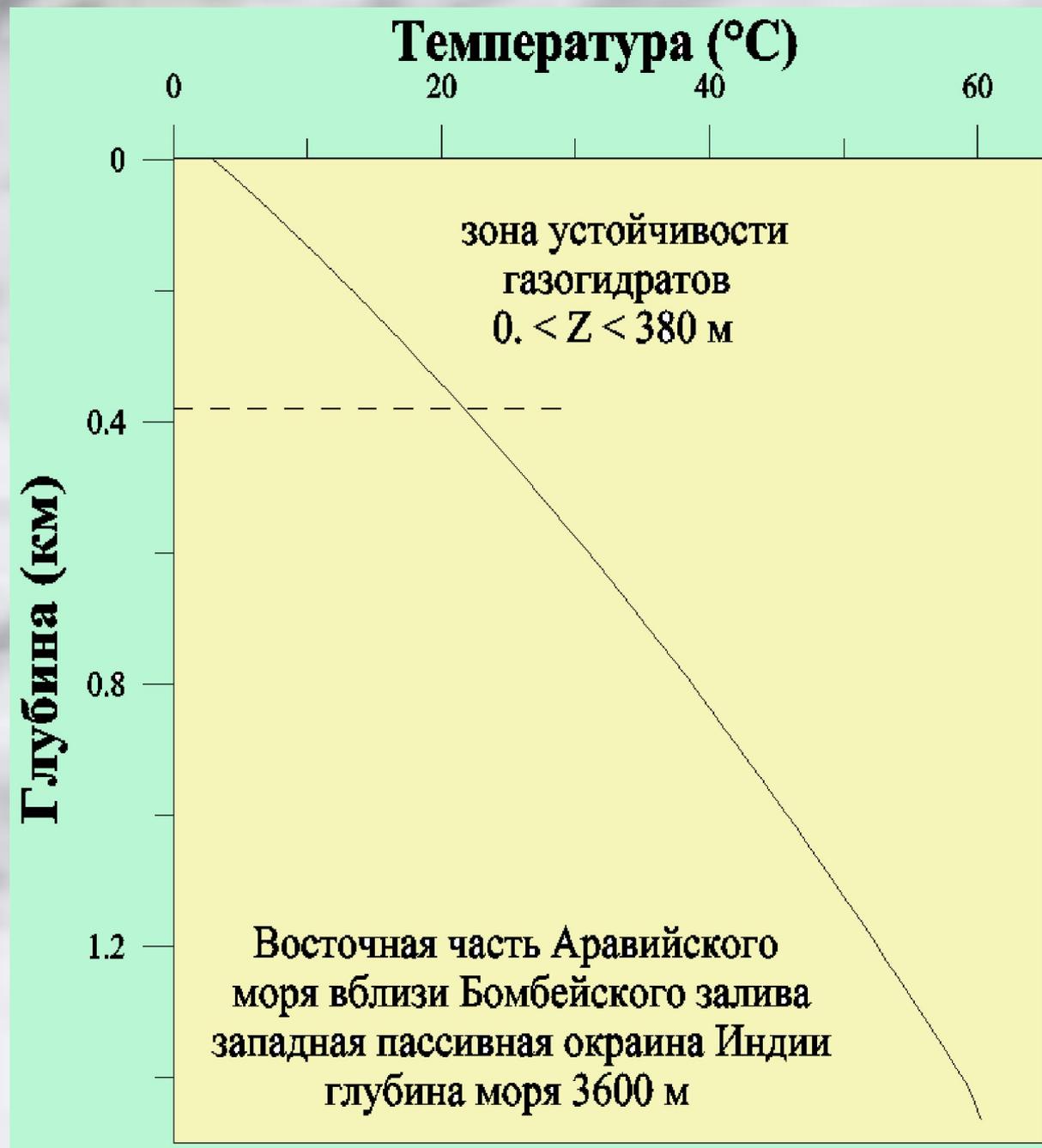


**В настоящее время по нашим оценкам зона устойчивости метановых газогидратов на Уренгойской площади находится на глубинах от 240 до 700 м.**

**На некоторых месторождениях залива Аляска и дельты реки Мак Кензи, основание этой зоны погружается до глубин 1000 и более м ниже дна моря (табл. 5; Sloan, 1990; Collet, 2002).**

**Западная  
пассивная окраина  
Индии  
(глубина моря  
3600 м)**

**Как видно из  
диаграмм рис. 9  
зона устойчивого  
существования  
метановых  
газогидратов прос-  
тирается вглубь  
осадочной толщи  
от поверхности дна  
океана до глубины  
около 380 м**



# *Механизм формирования скоплений газогидратов*

**Основной объём газогидратов формируется в природе по водофильтрационному механизму.**

**Уменьшение растворимости метана в воде при сокращении температуры есть основная причина выпадения гидратов в пределах поля их устойчивого существования.**

**Эти газогидраты формируются из метана, содержащегося в водах, фильтрующихся снизу вверх в область более низких температур.**

# **Формирование больших скоплений газовых гидратов требует большого объёма и газа и воды.**

**Поэтому наличие больших количеств УВ газов (биогенных или/и термогенных) является важным фактором, контролирующим формирование и распределение газовых гидратов в природе.**

**В большинстве морских гидратов метан биогенного происхождения (микробиогенный). Но в Мексиканском заливе, северной Аляске и в дельте реки Мак Кензи он термогенного происхождения, как предполагают данные изотопного и молекулярного анализа (Collet, 2002).**

**Если отсутствуют эффективные пути миграции газа и воды, обеспечивающие их поступление в зону формирования газогидратных скоплений, то маловероятно формирование заметных залежей газовых гидратов.**

**Следовательно, проницаемость пород и распределение разломов должны рассматриваться как возможные факторы образования путей снабжения гидратных резервуаров газом и водой.**

**Наличие покрышек и пористых пород резервуара – неперемнное условие формирования газогидратных месторождений.**

**В глинистых осадках газогидраты могут формироваться лишь в условиях, когда осадок находится в разуплотненном, разжиженном состоянии (верхние 20-100 м морских отложений).**

**Газогидраты материковых отложений встречаются почти исключительно внутри песчаных пород (Курчиков, 1992).**

**При образовании газогидратов имеет место миграция газа и влаги к местам активного роста гидратов.**

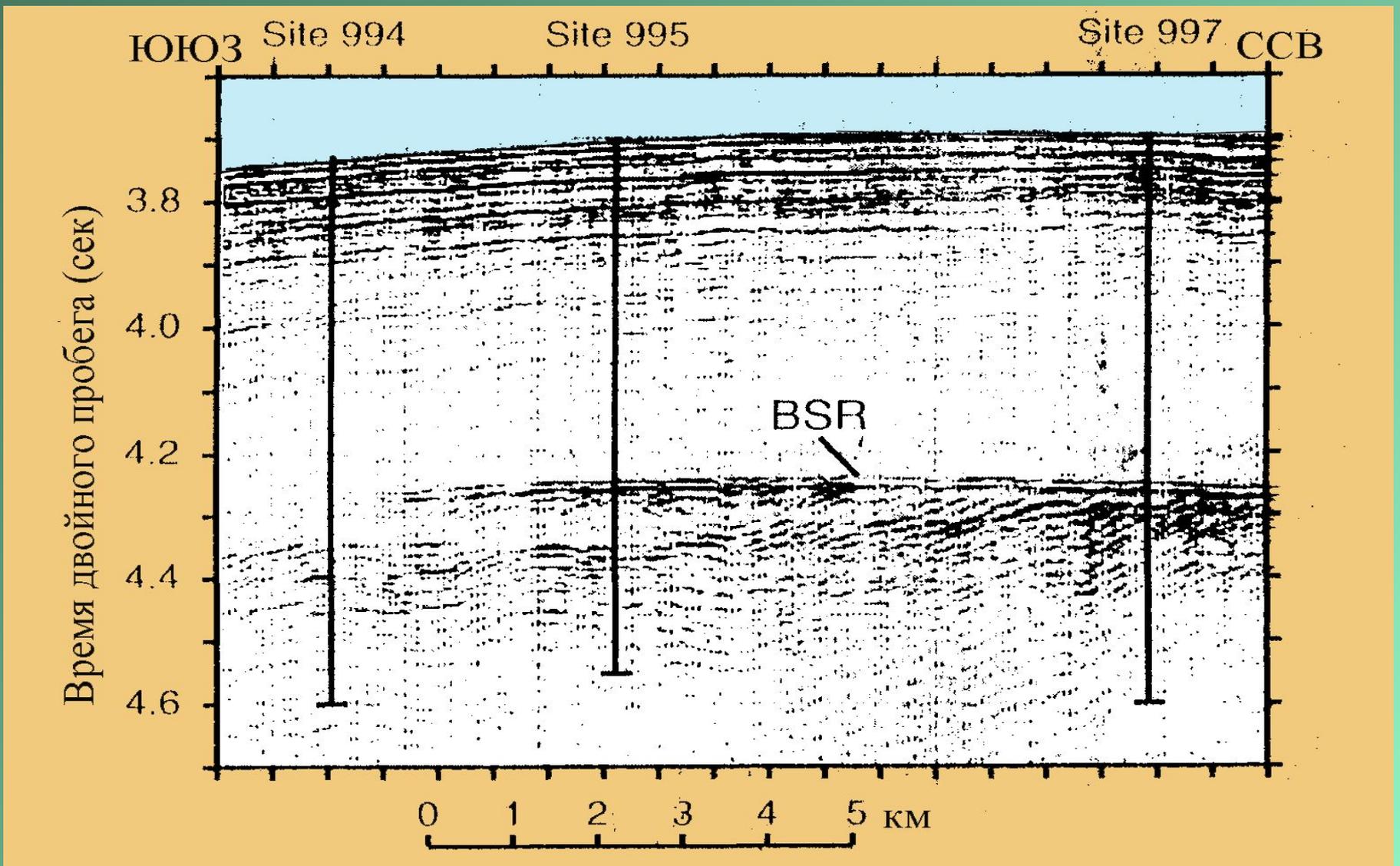
**Наличие в песчаных породах глинистых частиц затрудняет влагоперенос и газообмен внутри породы.**

**Поэтому в уплотненных песчаных породах гидратообразование прекращается при переходе от легких супесей с содержанием глинистых частиц 2-5% к тяжелым супесям с содержанием этих частиц 5-10% (Истомин, Якушев, 1992).**

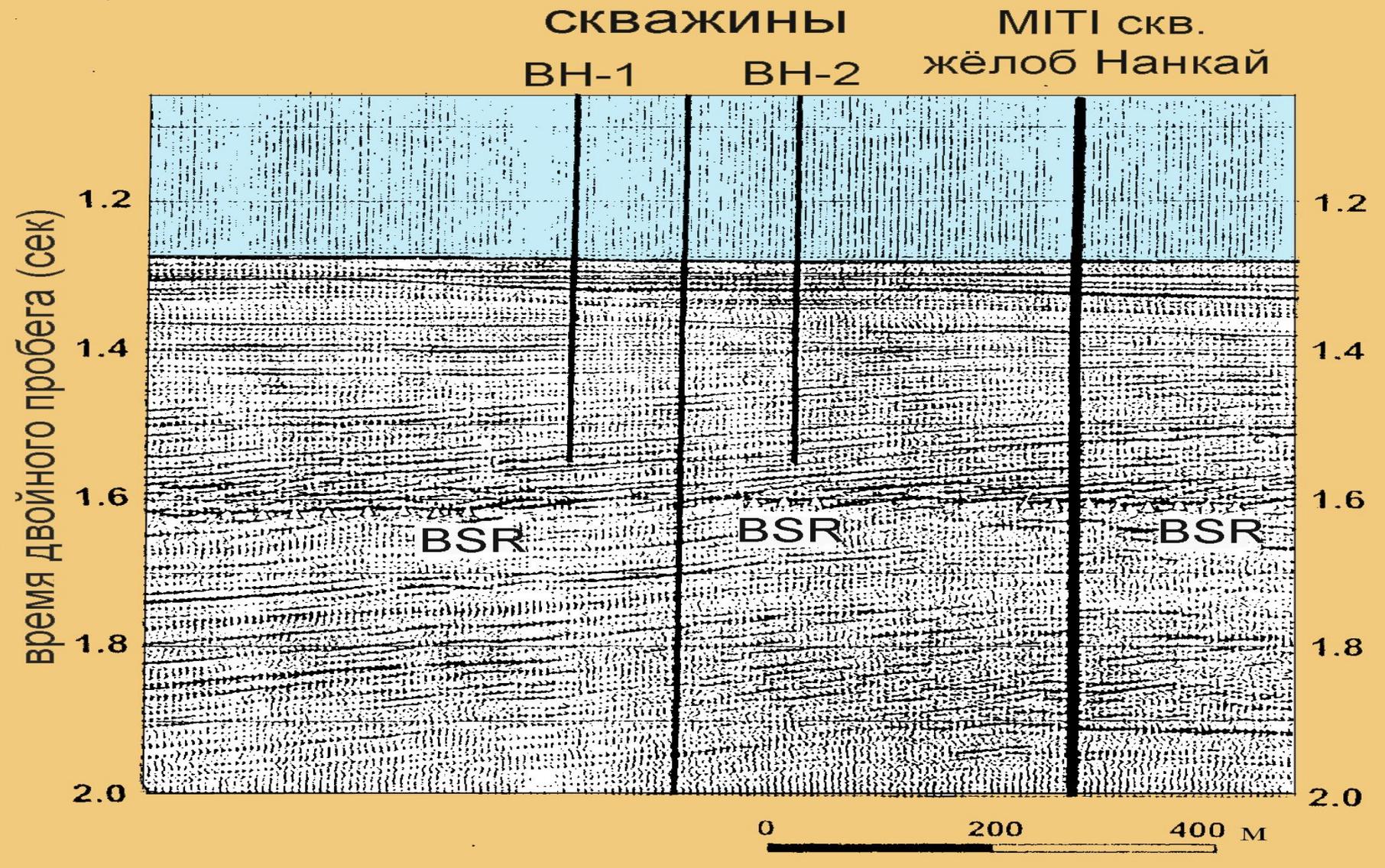
*Аномальный сейсмический отражающий горизонт (BSR-Bottom Simulating Reflector) и зона устойчивости газовых гидратов*

**На сейсмических профилях донный рефлектор (отражающий горизонт, повторяющий рельеф дна или BSR - Bottom Simulating Reflection) выражен отчётливо в силу своей интенсивности и пересечения литологических границ (рис. ниже).**

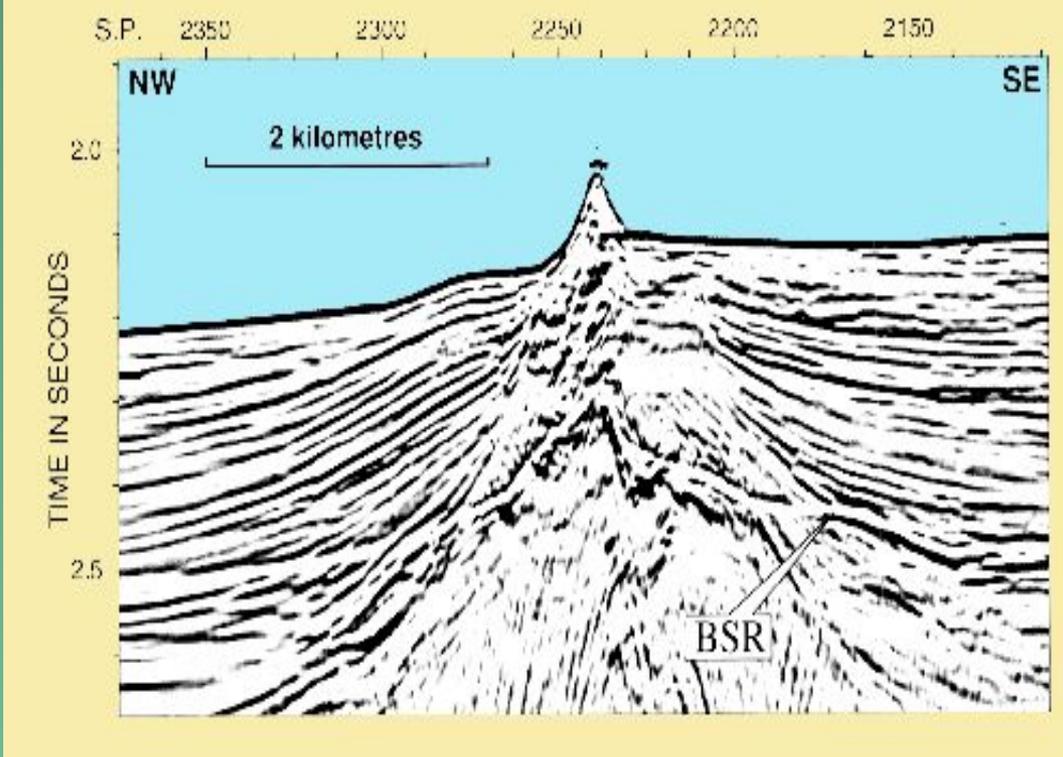
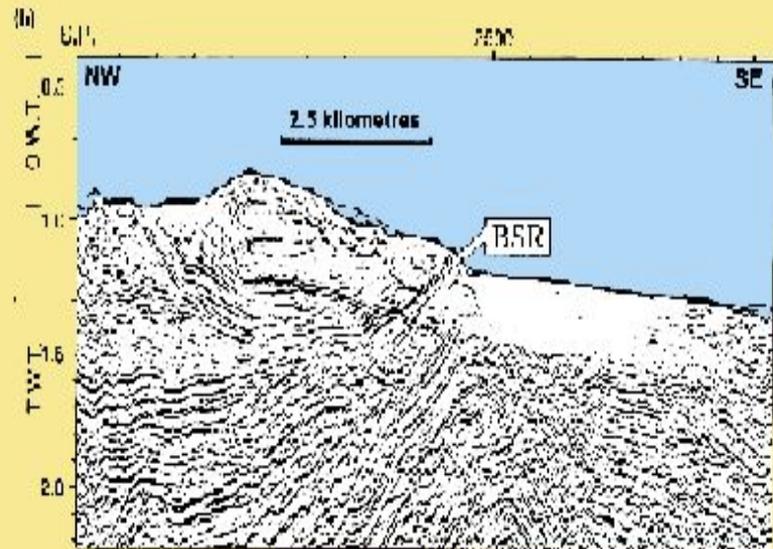
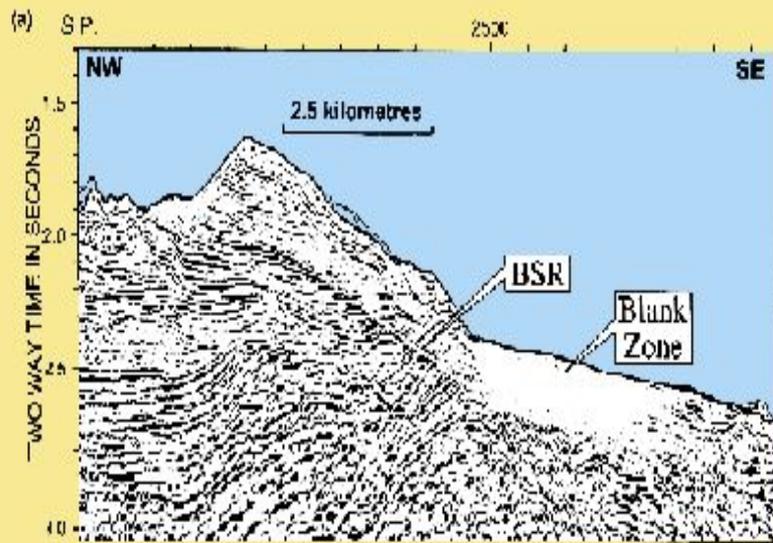
**Обычно появление этого горизонта интерпретируют как сейсмический знак основания зоны газовых гидратов: зона свободного газа может располагаться непосредственно под сейсмической границей BSR (Carcione et al., 2005).**



Сейсмические профили вдоль линии, соединяющей скв. DSDP 994, 995 и 997, расположенные в пределах хребта Blake Ridge (Атлантический шельф США; рис. 6) (Collet, 2002).



Сейсмический разрез вдоль МІТІ профиля в жёлобе Нанкай (Collet, 2002).



**Грязевой вулкан на дне моря и отражательный горизонт BSR на глубине 250 мсек ниже дна моря Эта глубина предполагает под вулканом более высокий тепловой поток, чем под его флангами, где глубина BSR 300 мсек.**

**BSR в осадочных бассейнах между островами Сулавези и Борнео в Индонезии (северная часть бассейна Макаassar).**

**Появление донного рефлектора (BSR) вызвано резким изменением скоростей сжатия и плотности пород.**

**Возможные причины контраста  $V_p$  и  $\rho$ :**

- (1) контраст скоростей при переходе от слоя пород, содержащих гидраты, к породам со свободным газом в порах;**
- (2) контраст слоя пород с гидратами со слоем пород без УВ в порах,**
- (3) контраст между слоем пород с небольшим количеством газовых гидратов и подушкой свободного газа под ним (присутствие совсем небольшого количества свободного газа (около 1% порового объёма) достаточно, чтобы сгенерировать донный рефлектор, BSR).**

**Например, многоканальное сейсмическое зондирование осадочного разреза на сев-зап. шельфе Баренцева моря предполагает осадки, содержащие газогидраты и покрывающие зону аккумуляции свободного газа, т.е. механизм 3 (Гинсбург, Соловьёв, 1994; Laberg et al., 1998)**

**Ранее считалось, что контраст плотностей вызван целиком разностью  $V_p$  в газогидратах ( $V_{\text{гидр}}=3.3 - 3.8$  км/сек; Laberg et al., 1998) и породах без УВ ( $V_{\text{пор}}=2.4 - 2.7$  км/сек). По этому контрасту и оценивались объёмы газогидратов, что приводило к завышению их объёмов на порядки величин**

**Хотя породы, насыщенные газогидратом и характеризуются более высокими сейсмическими скоростями, чем насыщенные водой (Collett, 1993), но исследования показали, что в большинстве случаев донный рефлектор (BSR) обязан своим появлением не столько положительным аномалиям  $V_p$ , вызванным присутствием газогидратов, концентрация которых обычно мала, сколько присутствию непосредственно ниже свободного газа с отрицательными аномалиями Р-волн (Carcione et al., 2005).**

**Частым заблуждением является отождествление основания зоны с наличием скоплений гидратов в морских осадках с основанием зоны их P-T устойчивости.**

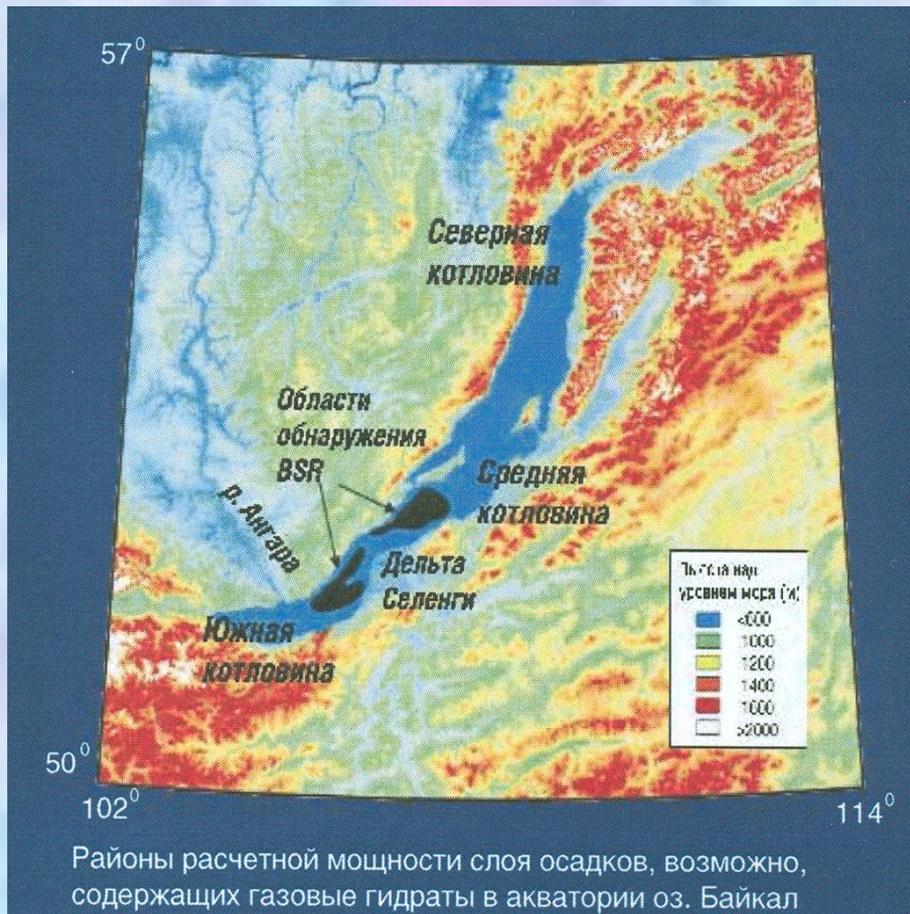
**Это справедливо лишь в случае, когда имеется поток метана снизу, достаточный для формирования гидратов ( $q > q_m$ ). Во многих случаях основание зоны гидратных скоплений располагается на значительно более мелких уровнях, чем основание зоны их P-T устойчивости. Для формирования газогидратного скопления помимо нахождения породы в пределах поля устойчивости необходимо, чтобы количество метана, принесённого снизу водой к породам рассматриваемого горизонта, перевосходило его количество, способное раствориться в поровой воде при P-T условиях данных глубин (Xu and Ruppel, 1999).**

**Если отражающий горизонт (BSR) маркирует кровлю зоны свободного газа, то он может располагаться и заметно глубже основания зоны устойчивого существования газогидратов. Может оказаться, что между зоной свободного газа и зоной присутствия и устойчивости гидратов будет слой, не содержащий ни гидратов, ни свободного газа. Тогда отражательный горизонт (BSR) будет ниже зоны наличия и устойчивости гидратов.**

**В ситуации, когда свободного газа нет, отражательного горизонта (BSR) может и не быть вовсе.**

**Большинство геологов предпочитают интерпретировать отражательный горизонт (BSR) как совпадающий одновременно и с кровлей зоны свободного газа, и с подошвой зоны наличия газогидратов, и с подошвой зоны их устойчивости. Но так будет лишь при достаточно быстром осадконакоплении, когда количество метана, выделяющегося из воды, будет большим, и подушка газа будет формироваться тогда непосредственно под подошвой зоны устойчивого существования газогидратов (Xu and Ruppel, 1999).**

**Высокая скорость осадконакопления и достаточная генерация метана (преимущественно биогенного) характерны для южной половины озера Байкал, где скорее всего подушка газа формируется непосредственно под подошвой зоны устойчивого существования газогидратов.**



**Граница BSR на Байкале имеет особенность: она, против обыкновения, не повторяет в точности рельеф дна, а имеет неровную форму, местами прерываясь вблизи многочисленных разломов.**

**А. Гольмшток предположил, что в этих местах устойчивость газогидратов нарушается и метан от разложившихся газогидратов прорывается на поверхность дна озера (Клеркс и др., 2004).**

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



**В зимнее время пузырьки выделяющегося газа-  
вмерзают в лёд (Клеркс и др 2004)**



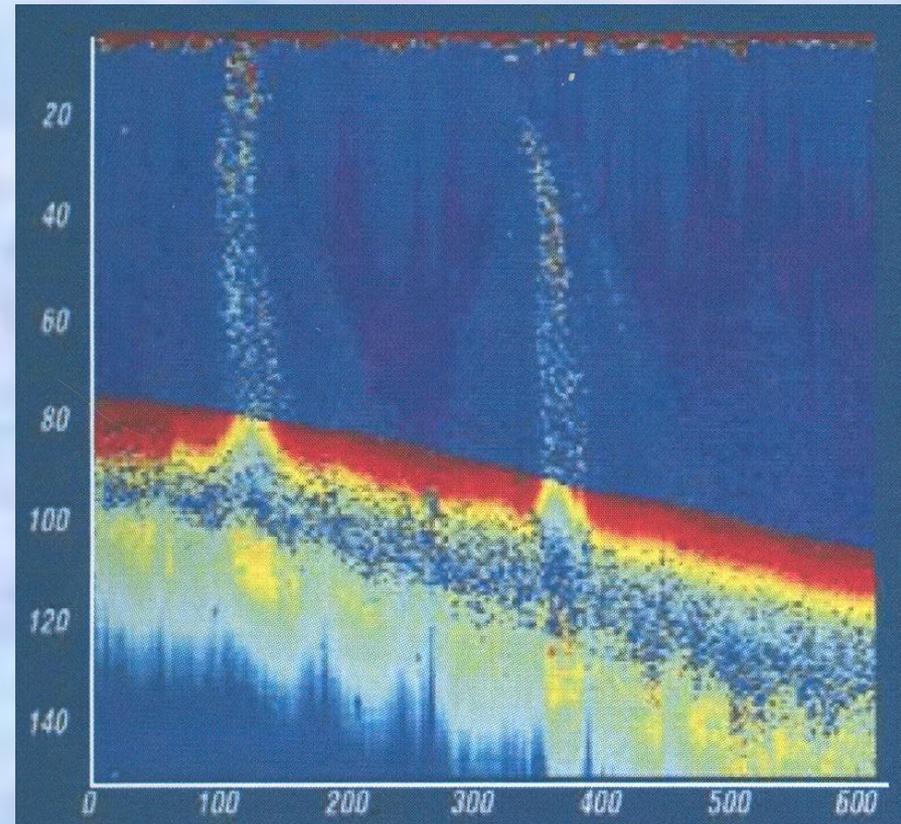
Пузырьки газа на поверхности озера — следы восходящих  
газовых факелов, поднимающихся со дна. *Фото Н. Гранина*

**Сейсмоакустический разрез  
Южно Байкальской котловины  
(Клеркс и др 2004)**

**Видны нарушения границы BSR  
с приподнятыми участками и раз-  
рывами. Показаны очаги  
разгрузки газа в районе грязевых  
вулканов.**



**Гидроакустическая съёмка  
газовых факелов выбросов  
метана в водную толщу  
из осадков озера Байкал.  
(Эхолотограмма Н. Гранина)  
(по (Клеркс и др., 2004)**



# *Оценки градиента температур и теплового потока через дно моря по глубине горизонта BSR*

**Определение теплового потока включает следующие ШАГИ (Yamano et al., 1982; Jackson, 2004; Depreitor et al., 2005):**

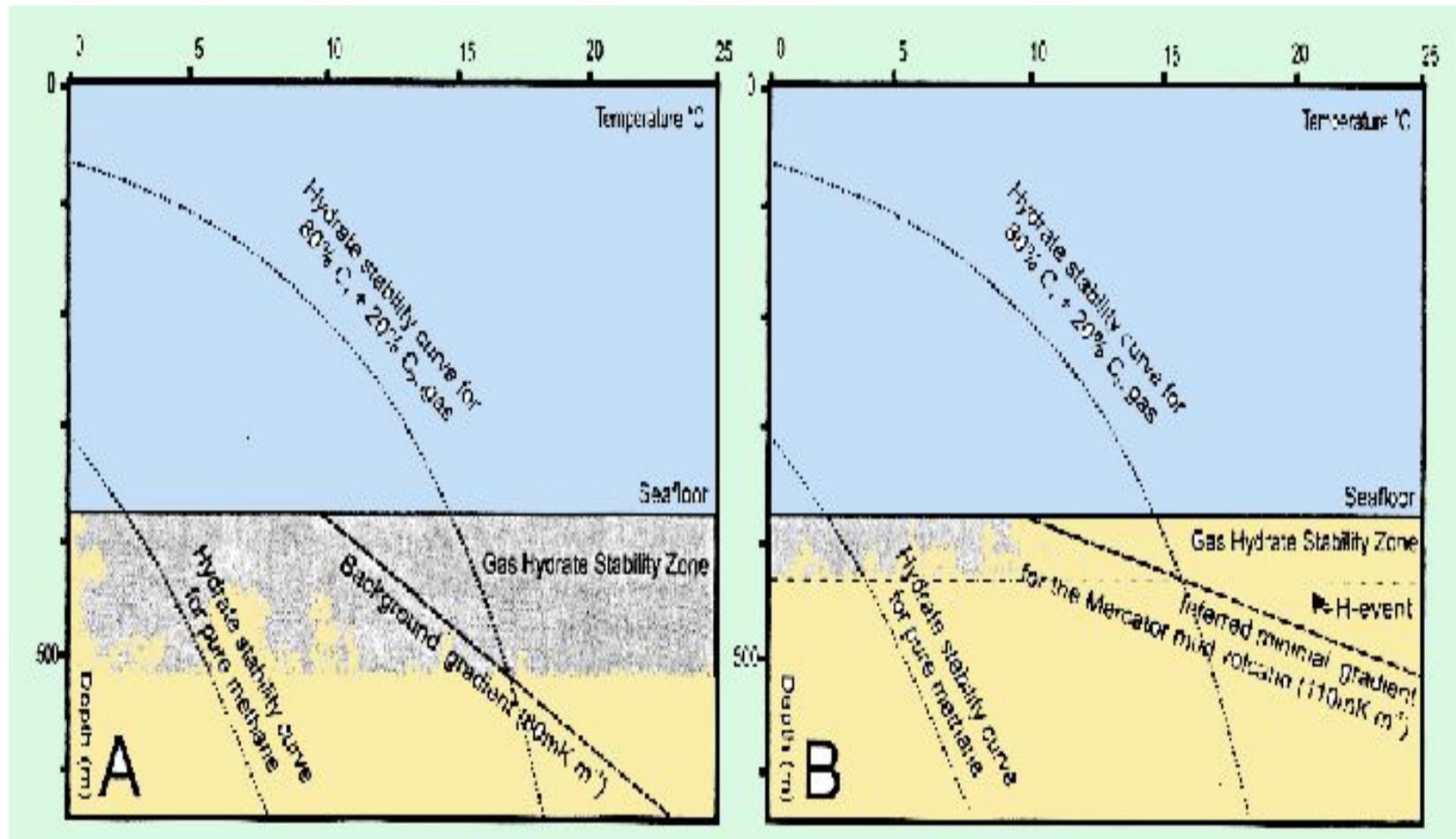
- 1) переход от двойного времени к глубине ниже дна моря, основанный на модели скоростей;**
- 2) вычисление гидростатического и литостатического давления;**
- 3) вывод эквивалентной температуры трёхфазового равновесия газовых гидратов;**
- 4) определение геотермического градиента и теплового потока.**

**Градиент температуры определяется по температуре породы на дне моря ( $T_b$ ), температуре пород на глубине горизонта BSR ( $T_{bsr}$ ) и глубине этого горизонта ( $Z_{bsr}$ ).**

**Температуру  $T_{bsr}$  вычисляют в предположении, что горизонт BSR отражает скачок от плотности пород в пределах подушки свободных газов, скопившихся под непроницаемым слоем в основании зоны устойчивости газогидратов, к плотности пород слабопроницаемого слоя, содержащего небольшое количество газогидратов.**

**Пример определения  $dT/dz$  в районе грязевого вулкана Меркатор ( $110^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ) и для его флангов ( $60^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ) на шельфе Марокко (Depreiter et al., 2005).**

**Кривые равновесия для газогидратов с 20%  $\text{C}_{1+}$  и для чистого метана Они использовались при определении глубины основания зоны устойчивости г-г. Следующие параметры использовались в этих оценках :  $V_p = 1500$  м/сек – для воды,  $V_p = 1800$  м/сек – для осадочных пород под грязевым вулканом Меркатор в Марокко (плотность воды  $\rho_w = 1030$  кг/м<sup>3</sup>, плотность осадков  $\rho_s = 2300$  кг/м<sup>3</sup>, плотность матрицы осадков  $\rho_m = 2650$  кг/м<sup>3</sup>, плотность газогидратов  $\rho_h = 900$  кг/м<sup>3</sup> и осадки состоят из 20% гидратов и 80% матрицы). Тогда определялись глубина и давление основания зоны устойчивости г-г (давление возрастало от 3500 КПа под кратером вулкана до 6000 КПа под самой глубокой точкой моря).**



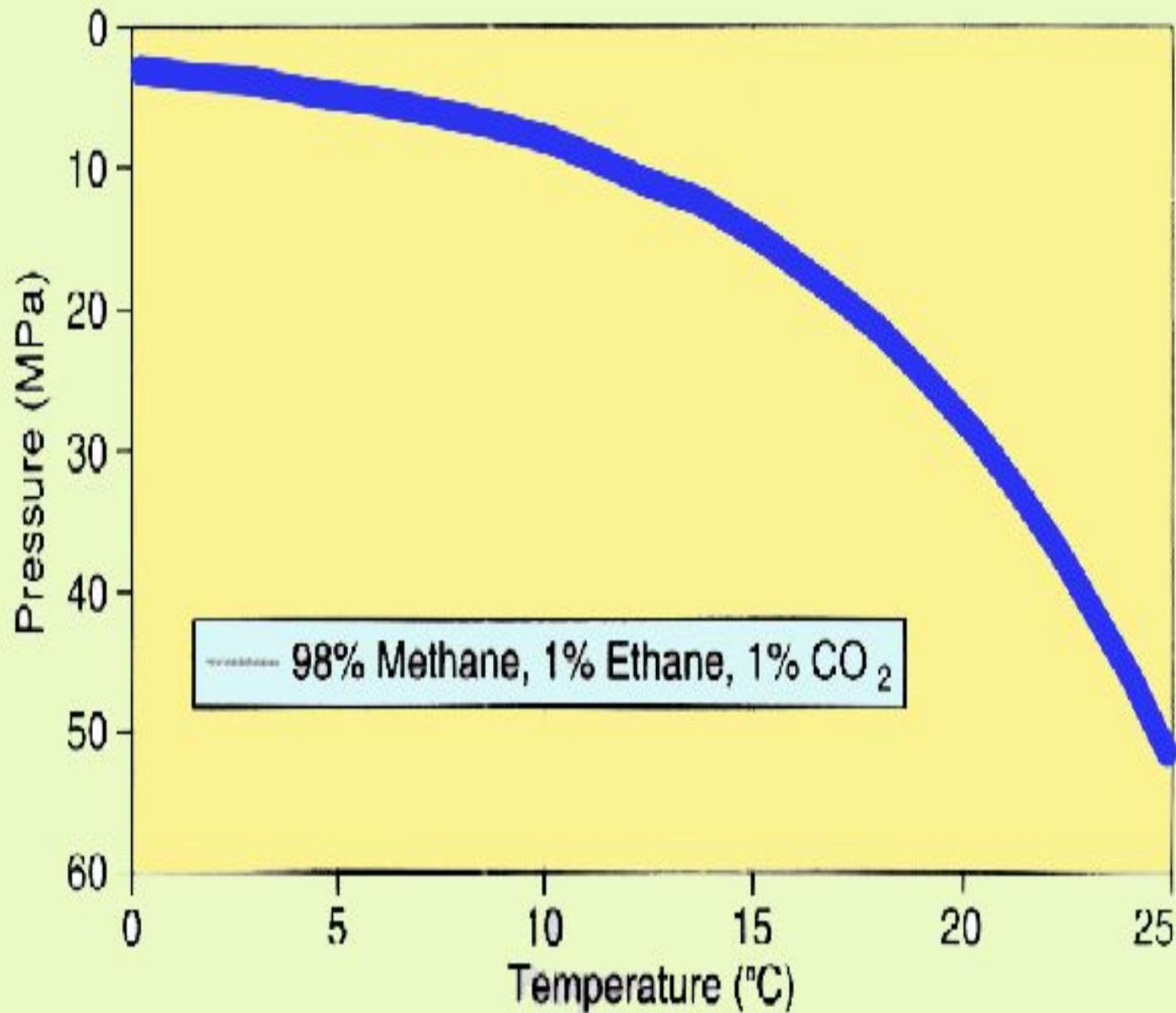
**Кривые равновесия для газогидратов с 20% C<sub>1</sub>+ и для чистого метана. Зоны устойчивости для грязевого вулкана Меркатор (110°С/км) и для его флангов (60°С/км) (шельф Марокко; Depreiter et al., 2005).**

**Пример газогидратной системы северной части бассейна Макаassar (в проливе между островами Борнео и Сулавеси в Индонезии - глубина границы BSR около 300 м ниже дна моря).**

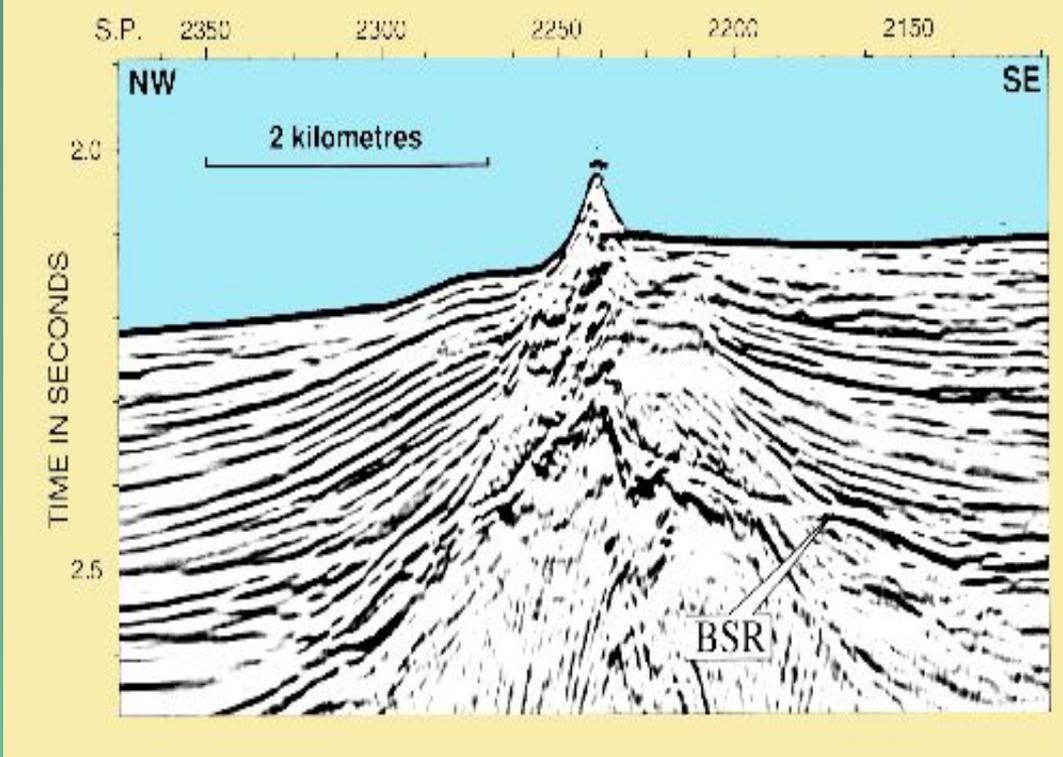
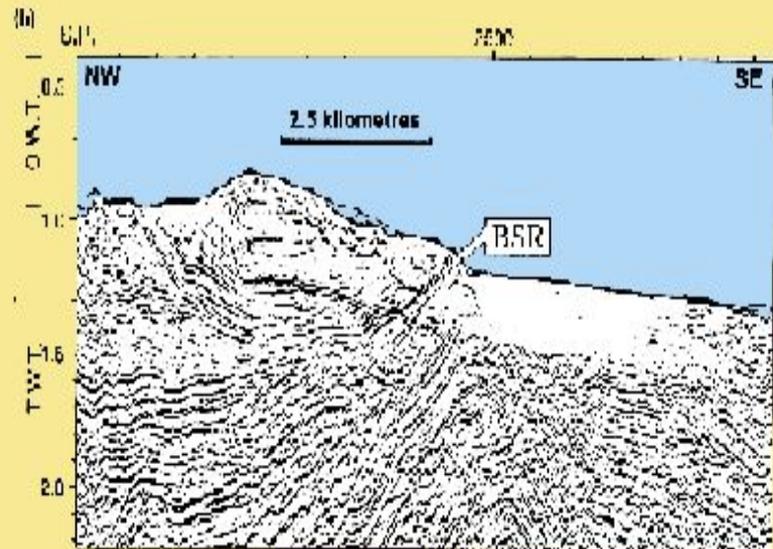
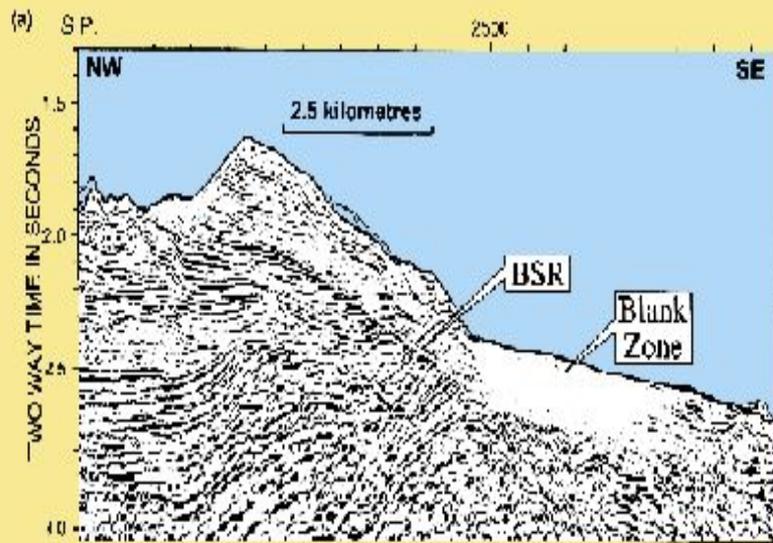
**(Jackson, 2004)**

**В оценках принимались  $V_p = 1500$  м/сек в воде,  $V_p = 1200 - 1500$  м/сек - для пород в пределах подушки свободного газа,  $V_p = 1550 - 1755$  м/сек - для пород с газогидратами над границей BSR (среднее  $V_p = 1625$  м/сек).**

**Температура  $T_{bsr}$  в подошве зоны устойчивости газогидратов рассчитывалась по кривой P – T равновесия (вода с 3.5% соли и с 98% метана, 1% этана и 1%  $CO_2$ ).**



**Кривая  
фазового  
равновесия  
морской  
воды (3.5%  
соли) с  
газогидра-  
том и газом  
98% метана,  
1% этана  
и 1% CO<sub>2</sub>  
(Jackson,  
2004).  
P(МПа) =  
P<sub>0</sub>+10 · z(км)**



**Грязевой вулкан на дне моря и отражательный горизонт BSR на глубине 250 мсек ниже дна моря Эта глубина предполагает под вулканом более высокий тепловой поток, чем под его флангами, где глубина BSR 300 мсек.**

**BSR в осадочных бассейнах между островами Сулавези и Борнео в Индонезии (северная часть бассейна Макаassar).**

Оцененные значения градиента температуры уменьшались от  $dT/dz.=60^{\circ}\text{C}/\text{км}$  – в центральной части пролива Макассар до  $dT/dz.=20^{\circ}\text{C}/\text{км}$  к востоку от неё.

Тепловой поток  $q = -k \times (dT/dz)$ , где  $k$  – теплопроводность.

Использовалось приближённое соотношение:

$$k = 0.8243 \times V_p - 0.3237$$

(по данным в Центрально-Американском и Нанкай жёлобах), так что для средней  $V_p = 1625$  м/сек -  $k = 1.016$  Вт/м<sup>°C</sup>.

Значения теплового потока  $q$  уменьшались от  $75$  мВт/м<sup>2</sup> на шельфе Калимантана до  $60$  мВт/м<sup>2</sup> в середине пролива Макассат, затем до  $45$  мВт/м<sup>2</sup> в складчатом поясе западного Сулавеси, до  $35$  мВт/м<sup>2</sup> на западном шельфе Сулавеси и резко падали до  $20$  мВт/м<sup>2</sup> в юго-западном крыле Сулавеси (Jackson, 2004).

## **Ошибки определения $dT/dz$ и $q$**

- 1) Давление – глубина:** Для грязевого вулкана Меркатор (Марокко) ошибки  $\Delta P / P$  составляли от 2 до 6.5%.
- 2) Температура  $T_{BSR}$ :** Ошибки в определении  $T_{BSR}$  заметно сокращаются из-за логарифмического характера зависимости  $T$  от  $P$ .
- 3) Средняя скорость  $V_r$  в осадках,** определяющая глубину горизонта BSR - наиболее важный параметр в определении градиента температуры.
- 4) Теплопроводность.**

**В целом, ошибка в  $dT/dz$  оценивается в 15%, а в тепловом потоке в 25% (Depreiter et al., 2005).**

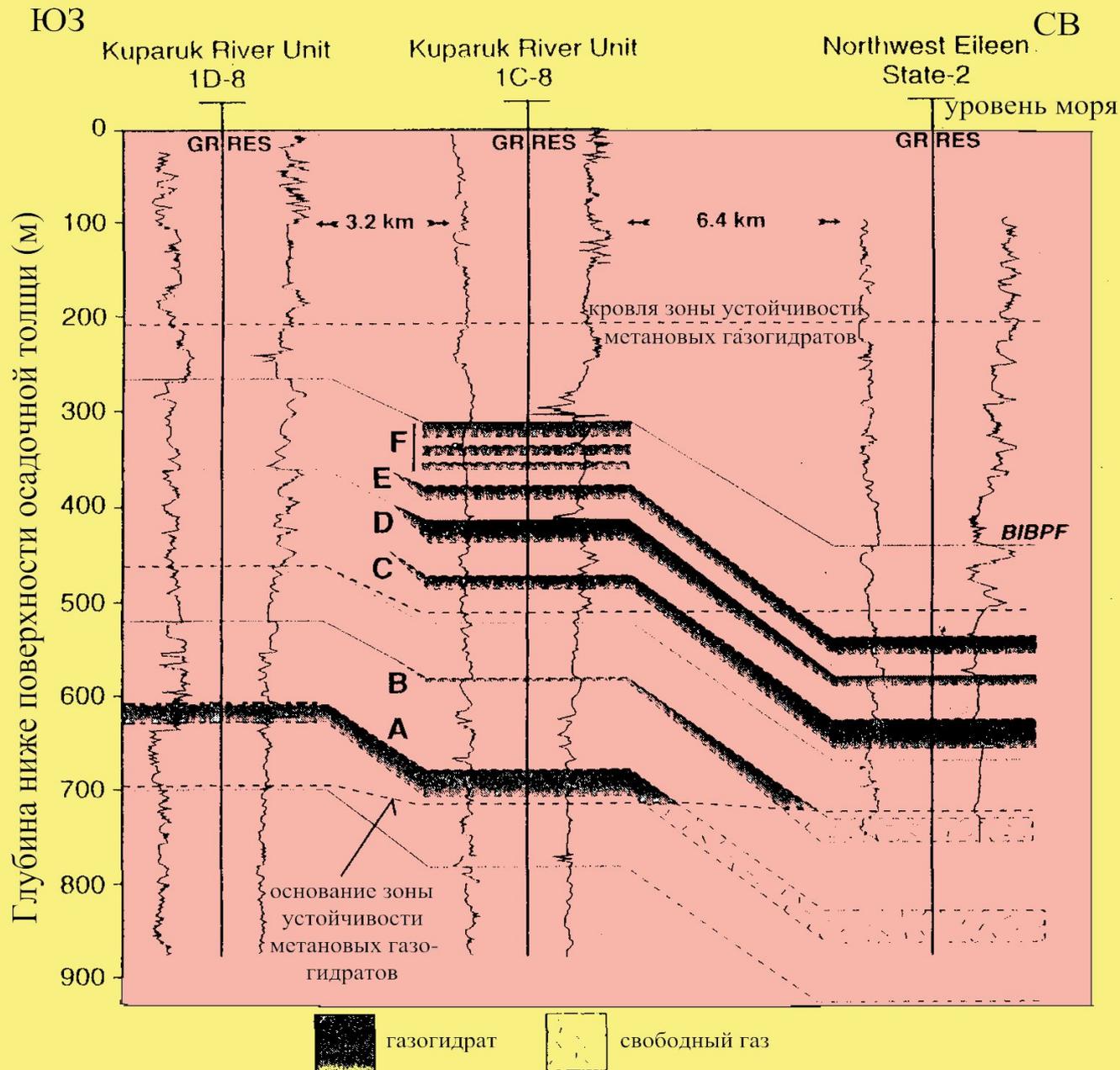
- 5) Состав гидратов:** часто не получается для образца, а используется некий осреднённый, предполагаемый. Полагают, что вариации в составе газовых гидратов в регионе невелики.

# *Оценки объёма газа в областях со скоплениями газогидратов*

**Объём газа, содержащегося в газогидратном скоплении, зависит в основном от пяти параметров (Colett, 1993; 2002):**

- 1) размера площади распространения газогидратной залежи,**
- 2) толщины резервуара, содержащего гидраты,**
- 3) пористости осадочных пород в резервуаре,**
- 4) насыщенности газогидратами (процент порового пространства, занятого газовыми гидратами),**
- 5) гидратного номера рассматриваемого газогидрата.**

**Значения этих параметров могут заметно меняться не только для разных гидратных скоплений мира, но и для разных гидратных горизонтов в пределах одной площади (табл. 2-10 и 3-10).**



**Характеристики резервуаров и оценки объёма газа в газогидратах осадочных прослоек А-Ф в месторождении Прадха Бэу на Аляске (Colett, 1993).**

# Характеристики резервуаров и оценки объёма газа в газогидратах осадочных прослоек А-Ф в месторождении Прадха Бэу на Аляске (Colett, 1993).

Гидратный слой	Площадь (км <sup>2</sup> )	Средняя толщина (м)	Средняя пористость (%)	Насыщенность гидратами (%)	Объём газа (10 <sup>12</sup> м <sup>3</sup> ) n=7.475	Объём газа (10 <sup>12</sup> м <sup>3</sup> ) n=6.325
<b>A</b>	<b>334</b>	<b>17</b>	<b>38</b>	<b>85</b>	<b>0.301</b>	<b>0.355</b>
<b>B</b>	<b>122</b>	<b>14</b>	<b>37</b>	<b>86</b>	<b>0.076</b>	<b>0.089</b>
<b>C</b>	<b>363</b>	<b>15</b>	<b>39</b>	<b>84</b>	<b>0.248</b>	<b>0.293</b>
<b>D</b>	<b>357</b>	<b>13</b>	<b>39</b>	<b>85</b>	<b>0.214</b>	<b>0.252</b>
<b>E</b>	<b>404</b>	<b>11</b>	<b>39</b>	<b>85</b>	<b>0.205</b>	<b>0.242</b>
<b>F</b>	<b>3</b>	<b>32</b>	<b>42</b>	<b>85</b>	<b>0.005</b>	<b>0.006</b>

$\Sigma = 1.049$

$\Sigma = 1.237$

**В общих оценках объёма гидратов средняя пористость пород, содержащих гидраты, принимается равной 30%, что типично для верхних горизонтов песчаников.**

## **Вариации насыщенности (S)**

**(S - процента порового пространства породы, занятого газовыми гидратами)**

**Одно из газогидратных скоплений в районе хребта Blake Ridge (Атлантическая окраина США) : S max от значения 7 и 8.4% в скв. DSDP 994 и 995 до 13.6% в скв. DSDP 997.**

**На континентальной окраине Каскадных гор в западной Канаде газовые гидраты располагались в пределах слоя мощностью 50-80 м над горизонтом BSR. Насыщенность газагидратами варировала от  $S_{min} = 5\%$  непосредственно под дном моря до  $S_{max} = 39\%$  вблизи забоя скв. DSDP 889.**

**См. табл. 5 и 28.**

## **Вариации толщины газогидратного резервуара**

**Обычно оценки полного объёма газогидратов в мировом океане или в таких больших регионах как Арктика или Атлантическая окраина делаются в предположении, что толщина газогидратного резервуара составляет 10% от мощности нижней половины зоны устойчивого существования гидратов.**

**Для Прадха Бэй это дало бы среднюю толщину резервуара 60 м.**

**На практике толщина гидратных тел меняется от первых см до первых м и лишь в редких случаях составляет первые десятки метров**

# Гидратный номер клатрата

Он определяет, какая часть структуры клатрата заполнена газом и зависит от типа гидрата.

**Общая формула газового гидрата имеет вид**



где **M** есть молекула газа и **n** меняется от 6 до 17 в зависимости от P-T условий и структуры гидрата (Истомин, Якушев, 1992). Коллет (Colett, 1993) предположил, что в природе степень заполнения клатратов газом меняется от 90% для гидратного номера  $n=6.325$  до 70% для  $n=7.475$ . Это должны быть максимальные и минимальные значения гидратных номеров в природе.

**1 м<sup>3</sup>** метанового газогидрата с  $n = 6.325$  даёт 164 м<sup>3</sup> метана (при станд. усл.) , а с  $n = 7.475$  - 139 м<sup>3</sup> метана.

Исследования г-г в прибрежной зоне острова Ванкувер даёт гидратные номера в интервале  $6.1 \pm 0.2$  (Lu et al., 2005).

При известных параметрах газогидратной залежи потенциальный объём газогидрата в залежи, оценивается по формуле:

$$V_{\text{Г-Г}} = \phi \times S \times \Delta h \times 10^6 \text{ (м}^3\text{/км}^2\text{)}$$

а объём газа, содержащегося в газогидратном скоплении, получается из соотношения:

$$V_{\text{метана}} = V_{\text{Г-Г}} \times V_{\text{п}} \text{ (м}^3\text{/км}^2\text{)}$$

где **S** - насыщенность газогидратами порового пространства, **φ** - средняя пористость пород гидратного резервуара, **Δh** – толщина резервуара (в м).

**Общие запасы природного газа в газогидратных скоплениях мира в областях распространения вечной мерзлоты на суше оцениваются объёмом от  $1.4 \cdot 10^{13}$  до  $3.4 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup> (табл. 1). Те же запасы в осадочном чехле океана составляют по оценкам от  $3.1 \cdot 10^{15}$  до  $7.6 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup>. Грубые оценки количества газа, содержащегося в скоплениях газовых гидратов всего мира, предполагают величину около  $2 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup>, что почти на два порядка превосходит известные современные запасы природного газа на Земле (около  $2.5 \cdot 10^{14}$  м<sup>3</sup>). (Для сравнения - мировая добыча газа за 20 лет с 1981 по 2000 лет составила около  $3.2 \cdot 10^{13}$  м<sup>3</sup>).**

<b>Газогидраты суши (в зонах пермафроста)</b>		<b>Газогидраты океана</b>	
<b>Количество газа (м3)</b>	<b>Ссылка</b>	<b>Количество газа (м3)</b>	<b>Ссылка</b>
<b><math>1,4 \cdot 10^{13}</math></b>	<b>Meyer, 1981</b>	<b><math>3,1 \cdot 10^{15}</math></b>	<b>Meyer, 1981</b>
<b><math>3,1 \cdot 10^{13}</math></b>	<b>Mclver, 1981</b>	<b><math>5-25 \cdot 10^{15}</math></b>	<b>Trofimuk et al., 1977</b>
<b><math>5,7 \cdot 10^{13}</math></b>	<b>Trofimuk et al., 1977</b>	<b><math>2 \cdot 10^{16}</math></b>	<b>Kvenvolden, 1988</b>
<b><math>7,4 \cdot 10^{14}</math></b>	<b>MakDonald, 1990</b>	<b><math>2,1 \cdot 10^{16}</math></b>	<b>MakDonald, 1990</b>
<b><math>3,4 \cdot 10^{16}</math></b>	<b>Dobrynin et al., 1981</b>	<b><math>4 \cdot 10^{16}</math></b>	<b>Kvenvolden, Claypool 1988</b>

**Недавние оценки потенциальных объёмов метана в скоплениях газовых гидратов бассейнов Канады (Majorovich and Osadetz, 2001) предполагают следующее распределение объёмов газа в пределах Канады:**

**$0.24-8.7 \times 10^{13} \text{ м}^3$  в дельте реки Маккензи и в море Бофорта,  $0.19-6.2 \times 10^{14} \text{ м}^3$  в Арктическом Архипелаге,  $1.9-7.8 \times 10^{13} \text{ м}^3$  на Атлантической окраине и  $0.32 - 2.4 \times 10^{13} \text{ м}^3$  на Тихоокеанской окраине Канады.**

**Потенциальный объём метана в газовых гидратах всей Канады оценивается величиной  $0.44 - 8. \times 10^{14} \text{ м}^3$ , что более чем на порядок превосходит известный на сегодняшний день газовый УВ потенциал Канады (примерно  $0.27 \times 10^{14} \text{ м}^3$ ; Majorovich and Osadetz, 2001).**

**В будущем при исследовании конкретных месторождений все приведённые оценки будут скорее всего снижены в несколько раз.**

**Основание для этого:**

- 1) Площади распространения газогидратной залежи не покрывают непрерывно всю потенциальную область наличия газогидратов, а проявляются локально, составляя в сумме около 10% потенциальной площади**
- 2) Толщина газогидратного резервуара  $\Delta h$  для Атлантической и Тихоокеанской окраин Канады не оценивалась по данным каротажа, как в других районах страны, а полагалась равной 110 м при средней насыщенности газогидратами 15%.**

**Оба фактора заметно завышают реальную ситуацию в пассивных окраинах континентов (см., табл. 5).**

**В этой связи можно отметить месторождение Мессояха в Западной Сибири, где аналогичные оценки проф. А. Макогона, сделанные в предположении, что толщина газогидратного резервуара  $\Delta h$  совпадает с шириной зоны стабильности газогидратов, дали огромный предполагаемый объём газогидратов на площади месторождения, который при более точном изучении месторождения сократился на несколько порядков (Collett and Ginsburg, 1994).**

**И всё же ожидаемые объёмы газов, хранящиеся в газогидратных скоплениях, впечатляющи.**

**Однако, до их разработки в промышленных масштабах пока ещё очень далеко.**

**Причины - газовые гидраты относятся к нетрадиционным источникам энергии, добыча и использование которых требует особой технологии и существенных дополнительных материальных затрат по сравнению с добычей обычных горючих ископаемых, таких как нефть и газ. Это связано с тем, что хотя значительная часть морских континентальных шельфов, по-видимому, подстилается газовыми гидратами, но их концентрация внутри большей части морских отложений должна быть очень низкой.**

**К тому же гидраты расположены, как правило, в неуплотнённых богатых глиной породах, которые плохо держат давление жидкости, внедряемой в пласт по технологии извлечения газов из гидратов.**

**Это создаёт большие, почти неразрешимые проблемы с добычей газа из морских газогидратных скоплений.**

**И только в таких морских областях, как в жёлобе Нанкай и, возможно, в Мексиканском заливе, могут быть найдены газовые гидраты в большой концентрации и в более удобных кластических резервуарах с более прочными породами (Colett, 1993; 2002).**

**В настоящее время осуществляются специальные правительственные программы по изучению газогидратных месторождений в Индии, Японии (жёлоб Нанкай) и США. Эти исследования безусловно дадут полезную информацию по поиску и разработке таких месторождений.**

**И всё же, следует ли ожидать существенной добычи газа из газовых гидратов в мире в широких масштабах? – Ответ: вряд ли, по крайней мере в ближайшие 30-50 лет, хотя в отдельных странах с уникальной технологией, возможно, и будет добыча газа из гидратов в следующие 5-10 лет (Colett, 2002).**

**Необходимо преодолеть значительные технические трудности, прежде чем газовые гидраты будут рассматриваться как заметный источник добычи природных газов.**