ISSN 0016-7886

ГЕОЛОГИЯ и ГЕОФИЗИКА

RUSSIAN GEOLOGY AND GEOPHYSICS



Том 43, 2002

Специальный выпуск

ТРУДЫ VI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ГАЗЫ В МОРСКИХ ОСАДКАХ»

НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СО РАН
ФИЛИАЛ «ГЕО»

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

Основан в январе 1960	Периодичность 12 раз в год	Том 43, № 7	Июль 2002

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК
Труды VI международной конференции „Газы в морских осадках“

Предисловие 585

ГЕОХИМИЯ И БИОГЕОХИМИЯ ГАЗОВ В ВОДАХ И ДОННЫХ ОСАДКАХ МОРЕЙ И ОЗЕР

Бондарев В. Н., Рокос С. И., Костин Д. А., Длугач А. Г., Полякова Н. А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря 587

Джадд А., Джукс В. Леддра М. База данных MAGIC по морским газовым источникам и их индикаторам 599

Обжиров А. И., Верещагина О. Ф., Соснин В. А., Шакиров Р. Б., Салюк А. Н., Ламмерс Ш., Зюсс Э., Бибоу Н., Винклер Г., Дружинин В. В. Мониторинг метана в водах восточного шельфа и склона острова Сахалин 605

Лейфер И., Кларк Дж. Моделирование рассеянных компонент в углеводородных газовых источниках. Применение к подводным источникам в желобе Санта-Барбара 613

Мурадов Ч. С. Прикладные аспекты изучения летучих углеводородов морских бассейнов 622

Гранин Н. Г., Гранина Л. З. Газовые гидраты и выходы газов на Байкале . . . 629

Исаев В. П., Коновалова Н. Г., Михеев П. В. Природные газы Байкала 638

Намсараев Б. Б., Земская Т. И., Дагурова О. П., Гранина Л. З., Голобокова Л. П., Ситникова Т. Я. Бактериальные сообщества донных осадков в районе гидротермального источника бухты Фролиха (*Северный Байкал*) 644

ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ

Соловьев В. А. Глобальная оценка количества газа в субмаринных скоплениях газовых гидратов 648

Матвеева Т. В., Соловьев В. А. Геологический контроль скопления газовых гидратов на хребте Блейк Аутер, Северная Атлантика (*по материалам глубоководного бурения*) 662

Вассилев А., Димитров Л. Оценка пространственного распределения и запасов газогидратов в Черном море 672

Тохиди Б., Остергаард К. К., Бургасс Р. У., Лламедо М. Измерение границы гидратной фазы в пористой среде 685

Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Махонина Н. А., Якушев В. С. Фазовые переходы воды в газонасыщенных грунтах 689

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ОСАДКОВ

Кутас Р. И., Русаков О. М., Коболев В. П. Геолого-геофизические исследования газовыделяющих структур в северо-западной части Черного моря 698

Круглякова М. В., Кругляков В. В., Лавренова Е. А., Мараев С. Л. Акустические методы обнаружения газонасыщенных осадков в связи со строительством гидротехнических сооружений 706

НЕКРОЛОГ

Памяти Теруо Ватанабе (1944—2002) 712

НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СО РАН
ФИЛИАЛ „ГЕО“

SIBERIAN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

SCIENTIFIC JOURNAL

GEOLOGIYA I GEOFIZIKA

Founded in January 1960	Monthly	Vol. 43, № 7	Jule 2002

SPECIAL ISSUE

Proceedings of the VI International Conference on „Gas in Marine sediments"

Preface 585

GEOCHEMISTRY AND BIOGEOCHEMISTRY OF GASES IN WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS OF SEAS AND LAKES

Bondarev V. N., Rokos S. I., Kostin D. A., Dlugach A. G., and Polyakova N. A. Underpermafrost accumulations of gas in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea 587

Judd A., Jukes V., and Leddra M. MAGIC: a GIS database of marine gas seeps and seep indicators 599

Obzhirov A. I., Vereshchagina O. F., Sosnin V. A., Shakirov R. B., Salyuk A. N., Lammers S., Suess E., Biebow N., Winckler G., and Druzhinin V. V. Methane monitoring in waters of the eastern shelf and slope of Sakhalin 605

Leifer I. and Clark J. Modeling trace gases in hydrocarbon seep bubbles. Application to marine hydrocarbon seeps in the Santa Barbara Channel . . . 613

Muradov Ch. S. Applied aspects of study of volatile hydrocarbons in sea basins . . 622

Granin N.G. and Granina L.Z. Gas hydrates and gas venting in Lake Baikal 629

Isaev V. P., Konovalova N. G., and Mikheev P. V. Natural gases of Baikal 638

Namsaraev B. B., Zemskaya T. I., Dagurova O. P., Granina L. Z., Golobokova L. P., and Sitnikova T. Ya. Bacterial communities of the bottom sediments near a hydrothermal source in Frolikha Bay (*northern Baikal*) 644

GAS HYDRATES

Solov'ev V. A. Global estimation of gas content in submarine gas hydrate accumulations 648

Matveeva T. V. and Solov'ev V. A. Geologically controlled gas hydrate accumulation on the Blake Outer Ridge, western North Atlantic (*from DSDP and ODP data*) 662

Vassilev A. and Dimitrov L. Spatial and quantitative evaluation of the Black Sea gas hydrates 672

Tohidi B., Ostergaard K. K., Burgass R. W., and Llamedo M. Measuring hydrate phase boundary in porous media 685

Chuvilin E. M., Perlova E. V., Makhonina N. A., and Yakushev V. S. Phase transitions of water in gas-saturated grounds 689

GEOPHYSICAL METHODS OF STUDY OF GAS-SATURATED SEDIMENTS

Kutas R. I., Rusakov O. M., and Kobolev V. P. Gas seeps in the northwestern Black Sea: geological and geophysical studies 698

Kruglyakova M. V., Kruglyakov V. V., Lavrenova E. A., and Maraev S. L. Shallow gas: hazard to pipeline routing and detection techniques 706

OBITUARY

T. Watanabe (1944—2002) 712

NOVOSIBIRSK
PUBLISHED BY SIBERIAN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
PUBLISHING HOUSE OF SB RAS
BRANCH „GEO"

© Сибирское отделение РАН, 2002
© ОИГГМ СО РАН, 2002
Геология и геофизика, 2002

Геология и геофизика, 2002, т. 43, № 7, с. 662—671

УДК 552.578.1:55.004.58(261-16)

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СКОПЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ХРЕБТЕ БЛЕЙК АУТЕР, СЕВЕРНАЯ АТЛАНТИКА
(*по материалам глубоководного бурения*)

Т. В. Матвеева, В. А. Соловьев

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана, 190121, Санкт-Петербург, Английский пр., 1, Россия

Представлены результаты геологических исследований скопления газовых гидратов подводного осадочного хр. Блейк Аутер, выполненных на основе как опубликованных, так и новых данных, полученных авторами в итоге обработки материалов глубоководного бурения в 164 и 172 рейсах ODP. При достаточно хорошей изученности региона сейсморазведкой и бурением, геологические факторы, контролирующие это газогидратопроявление, остаются не вполне ясными. Выполнен анализ геологической, тектонической и гидрогеологической обстановок в районе хр. Блейк Аутер. Использован принципиально новый методический подход: скопление газовых гидратов рассматривалось как отдельный объект со своими специфическими характеристиками. Обосновано предположение, что изученное скопление газовых гидратов сформировано в условиях рассредоточенной фильтрации газосодержащих флюидов, определившей его форму и размеры. На основе геохимических, геофизических и литологических данных выявлены закономерности распространения газовых гидратов в пределах хребта. Данное скопление контролируется тектоническими факторами, имеет фильтрационную природу и тяготеет в основном к относительно грубозернистым отложениям.

Хребет Блейк Аутер, контуриты, газовые гидраты, миграция флюидов, фильтрация.

GEOLOGICALLY CONTROLLED GAS HYDRATE ACCUMULATION ON THE BLAKE OUTER RIDGE, WESTERN NORTH ATLANTIC
(*from DSDP and ODP data*)

T. V. Matveeva and V. A. Solov'ev

Results of geological investigation of gas hydrate accumulation within the underwater sedimentary Blake Outer Ridge are presented. The study was based on both published and new data that we obtained by processing 164 and 172 ODP leg observations. The geological control over the distribution of gas hydrates is not quite clear despite the detailed seismic surveys and drilling within the study area. The geologic, tectonic, and hydrogeologic conditions in the Blake Outer Ridge area have been analyzed. A radically new technical approach was used: The gas hydrate accumulation was examined as a separate object with its specific characteristics. It has been proved that the investigated gas hydrates formed under the conditions of dissipated percolation of gas-containing fluids, which controlled the shape and size of the accumulation. Based on geochemical, geophysical, and sedimentological data, the regularities of gas hydrate distribution within the Blake Outer Ridge have been established. The accumulation is controlled by tectonic factors, is of filtration origin, and occurs mainly in coarse-grained sediments.

Blake Outer Ridge, contourites, gas hydrates, fluid migration, filtration

ВВЕДЕНИЕ

В результате исследований, выполненных по проблеме субмаринных газовых гидратов в последние десятилетия, был сделан принципиально важный вывод: газовые гидраты характеризуются миграционной природой; они не рассеяны в осадочном чехле, как предполагалось ранее, а распространены преимущественно в виде скоплений [1, 2]. Скопление газовых гидратов — некоторый объем породы, поровое пространство которой в той или иной степени заполнено газовыми гидратами. Размеры таких скоплений могут быть любыми, поскольку они ограничены только областью распространения предельно газонасыщенной поровой воды; в условиях недонасыщения газовые гидраты не могут существовать в принципе. Пространственное положение скоплений газовых гидратов определяется термобарическими и флюидо-динамическими условиями. Флюидо-динамические условия определяют восходящий флюидоток, который транспортирует вещество (чаще всего воду с растворенным в ней газом) в область гидратонакопления в пределах термобарической зоны стабильности газовых гидратов.

Анализ данных наблюдений по всем известным газогидратопроявлениям показал, что имеются два типа скоплений газовых гидратов: скопления, связанные с очагами разгрузки флюидов на дне, которые формируются вблизи дна и контролируются флюидопроводниками (грязевые вулканы, диапиры, разломы), и скопления, не связанные с очагами разгрузки (находящиеся на значительной поддонной глубине), но также контролируемые потоками флюидов. Эти выводы подтверждаются результатами глубоководного бурения, выявившего приуроченность таких скоплений к зонам опреснения и к относительно грубозернистым отложениям [1, 2]. Форма и размер скоплений газовых гидратов, образованных в условиях сосредоточенной фильтрации флюидов, а также распределение

© Т. В. Матвеева, В. А. Соловьев, 2002

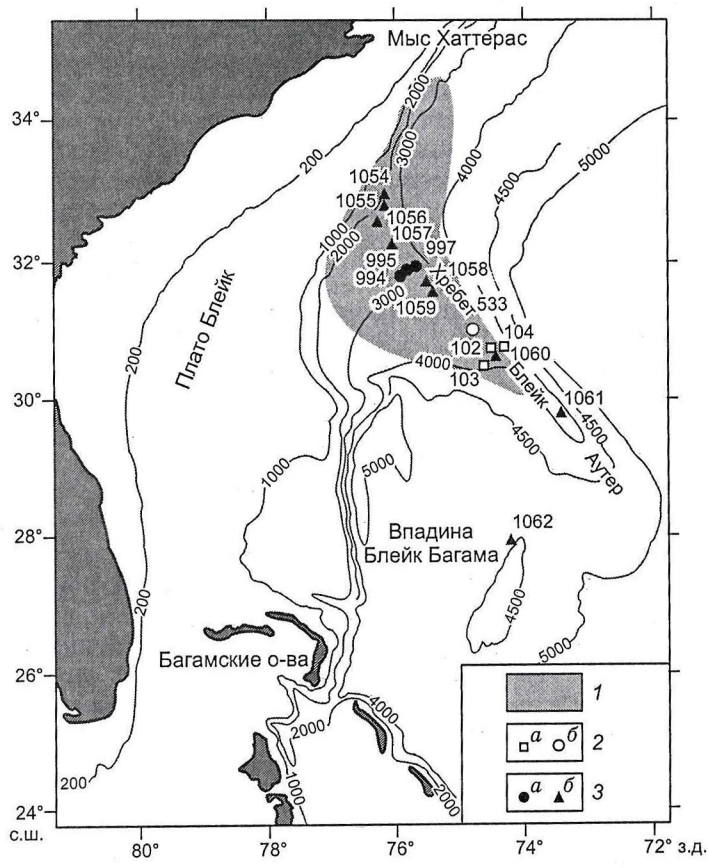


Рис. 1. Схема расположения станций глубоководного бурения в районе хр. Блейк Аутер (составлено по данным [10, 12, 13, 15, 19]).

1 — Площадь распространения отражающего горизонта BSR; скважины глубоководного бурения по программам: *2* — DSDP, 11 рейс (*а*), 76-й рейс (*б*); *3* — ODP, 164-й рейс (*а*), 172-й рейс (*б*). Изобаты оцифрованы в метрах.

гидратосодержаний в их пределах, определяются концентрированным потоком газосодержащих флюидов и диффузионным ореолом рассеяния [1—3]. Скопления гидратов второго типа, обусловленные рассредоточенной фильтрацией флюидов, известны в ограниченном количестве; чаще они только предполагаются по геофизическим данным.

Аккумулятивный хр. Блейк Аутер, образованный в результате деятельности контурных течений, является на данный момент одним из крупнейших и хорошо изученных газогидратоносных регионов. Скопление газовых гидратов в его пределах — уникальный пример гидратопроявления большого масштаба, образованного вне очагов разгрузки флюидов. Хребет Блейк Аутер расположен в Западной Атлантике, в 500 км к северо-востоку от п-ова Флорида (рис. 1) и представляет собой аккумулятивное образование длиной более 800 км, шириной 400 км и средней высотой 2 км. Гребень хребта протягивается к юго-востоку, в направлении, приблизительно перпендикулярном к континентальному подножию Северной Америки на отметках глубин от 2000 до 4800 м [4]. Результаты геофизических исследований дают основание считать, что хр. Блейк Аутер построен на переходном участке между континентальной и океанической корой [5, 6] и, располагаясь на осадочной толще, перекрывающей породы фундамента, никак не связан с особенностями его строения [7]. Это один из крупнейших осадочных хребтов, созданный деятельностью контурных течений. Осадочное тело хребта начало формироваться с олигоцена и несогласно залегает на почти горизонтальной толще мезозойских отложений [7—9].

В этом районе неоднократно проводилось глубоководное бурение по программам DSDP-ODP (Deep Sea Drilling Project — Ocean Drilling Program), направленное на изучение газовых гидратов и особенностей седиментации. Бурением и сейсморазведочными работами доказано широкое распространение газовых гидратов [10—13]. Нужно отметить, что в этом районе удельное количество газа, сконцентрированного в гидратах, наиболее значительное из всех известных в мире. По нашим оценкам, сделанным по данным [14], в центральной части скопления оно достигает 1 млрд $м^3/км^2$. Вместе в тем геологические факторы, контролирующие гидратоносность, остаются не вполне ясными.

Основная цель данного исследования — изучение закономерностей, контролирующих формирование скопления газовых гидратов в условиях рассредоточенной фильтрации флюидов. Важнейшей составной частью работы было выявление факторов геологического контроля распространения газовых гидратов в пределах хр. Блейк Аутер, в первую очередь, условий и процессов, обеспечивающих миграцию газосодержащих флюидов в зону гидратообразования. При этом одной из главных задач стало выделение относительно проницаемых горизонтов в толще контуритов и анализ их связи с гидратонакоплением.

Газовые гидраты и вмещающие их отложения. Присутствие газовых гидратов в пределах хребта устанавливается как по косвенным признакам (наличие ярко выраженного отражающего сейсмического горизонта Bottom Simulating Reflector — BSR, опреснение поровых вод, разжижение и газонасыщенность керна), так и визуальными наблюдениями на станциях 533, 994, 997 [12, 13, 15]. Расположение станций глубоководного бурения в районе хр. Блейк Аутер показано на рис. 1. Бурением на этой площади была вскрыта толща однородных, алевропелитовых карбонатсодержащих отложений средне- и позднеплиоценового и четвертичного возрастов. Вариации в составе и свойствах

исследуемых отложений минимальны. Газогидратоносная зона выделяется в интервале поддонных глубин приблизительно от 200 до 450 м. Гидраты в виде рассеянных включений белого цвета наблюдались визуально именно в плиоценовых отложениях. Размер включений составлял от 4—6 см в диаметре, иногда достигая 15—25 см [12, 13]. Согласно данным по хлорности поровых вод и результатам измерения температур в кернах, в гидратсодержащем интервале, вскрытом на станциях 994, 995 и 997, гидраты занимают более 1 % объема пород. По отрицательным аномалиям хлорности было оценено количество газовых гидратов в гидратсодержащих интервалах: так в некоторых интервалах разреза гидраты занимали до 14 % объема порового пространства [13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой для исследований послужили материалы глубоководного бурения по программам DSDP-ODP (11, 76, 164 и 172-й рейсы), в том числе результаты нашего собственного изучения образцов керна и поровой воды из скважин, пробуренных в 164-м (ст. 994, 995, 997) и 172-м (ст. 1057—1061) рейсах ODP, а также данные сейсмопрофилирования по этому району [7, 16, 17].

Гранулометрический состав отложений хр. Блейк Аутер исследовался с использованием стандартного комбинированного 13-фракционного пипеточно-ситового метода (фракции от >1 до <0,001 мм) [18]. Материалом для изучения были образцы керна (порядка 500 образцов) и данные о хлорности поровых вод по [13, 19], отжатых из тех же образцов, которые были использованы для гранулометрического анализа. В процессе работы результаты гранулометрического анализа сопоставлялись с данными о хлорности поровых вод (как показателя гидратсодержания отложений).

Для оценки сортированности осадка в пределах преобладающего интервала размерностей (фракции от 0,063 до <0,001 мм), мы попытались подобрать наиболее информативную характеристику. Рассчитывались такие показатели, как коэффициент сортировки Траска (S_0), коэффициент асимметрии (K_a), медиана (Md), относительная энтропия (H_r) по [20] и др. Применение стандартных гранулометрических коэффициентов не дало значимых результатов. Наиболее информативным параметром, как нам представляется, оказалась энтропийная характеристика сортировки. Для ее вычисления использовалась формула: $H_r = h'\{f^*(r)\}/h'\{f^*(r)\}_{max}$, где $h'\{f^*(r)\}$ — выборочная энтропия: $h'\{f^*(r)\} = -\sum_{i=1}^{n} p_i^* \ln p_i^*$, где n — число интервалов группирования (число фракций в анализе); p_i^* — частость, приходящаяся на i-й интервал (содержание в долях единицы частиц в i-й фракции); а $h'\{f^*(r)\}_{max}$ — максимально возможное значение выборочной энтропии, соответствующее равномерному распределению частиц по размерам $h'\{f^*(r)\}_{max} = \ln n$; H_r — нормированная величина ($0 \le H_r \le 1$). H_r, равная нулю, соответствует идеально сортированному осадку, когда все частицы сосредоточены в какой-то одной фракции. H_r, равная единице, характеризует абсолютно несортированный осадок [20, 21]. Интересно было установить корреляционную зависимость между коэффициентом Траска и энтропийной мерой сортировки. С этой целью было проанализировано соотношение коэффициентов H_r и S_0 для образцов, отобранных в 172-м рейсе (рис. 2). Коэффициент корреляции между двумя этими параметрами в интервале значений S_0 от 2 до 4 составляет 0,68 со значимостью 99,9 %. Это подтверждает, что H_r несет информационную нагрузку, вполне соответствующую понятию „фракционная сортировка частиц", и в случае, когда различия в сортировке между фракциями незначительны, может использоваться как наиболее информативная характеристика.

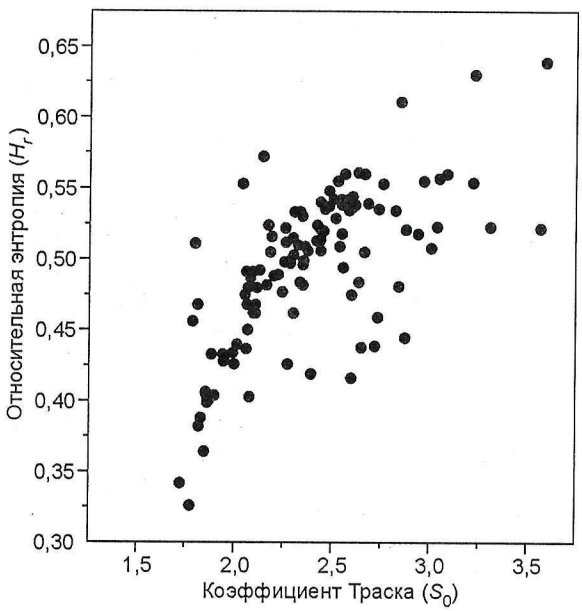


Рис. 2. Связь коэффициента Траска и энтропийной меры сортировки отложений по образцам из скв. 1057—1061 (172-й рейс ODP).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тектонический контроль. Материалы сейсмо- и магниторазведки свидетельствуют о неоднород-

ности геологического разреза в районе хребта. По данным [7, 8], хребет пересекают две значительные магнитные аномалии (Блейк Спур и М-25), маркирующие особенности фундамента. Возможно, этот район является краем рифтовой долины, которая, заполняясь осадками в син- и пострифтовую стадии осадконакопления, продолжала раскрываться, что могло создавать деформацию в вышележащей осадочной толще. О наличии разломных зон в отложениях свидетельствуют также материалы интерпретации двух параллельных сейсморазведочных профилей, пересекающих хребет в северо-восточном направлении (рис. 3, 4). Как видно из рис. 4, зона многочисленных разломов наблюдается в нижней части осадочного разреза как раз в районе ст. 994, 995, 997, где доказано присутствие гидратов, а также к юго-западу от них [16].

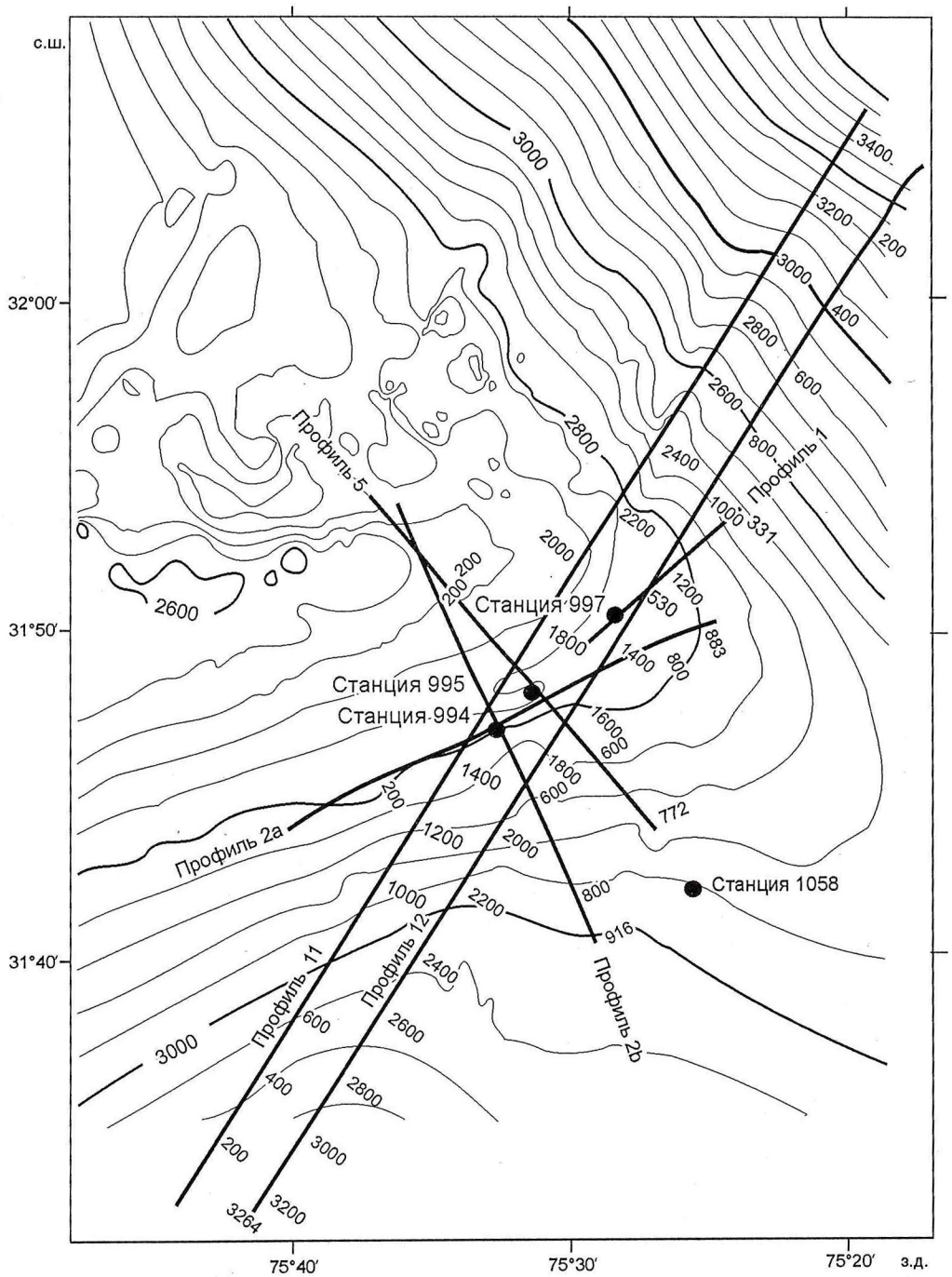


Рис. 3. Расположение сейсморазведочных профилей, пересекающих хр. Блейк Аутер [16].
Изобаты — в метрах.

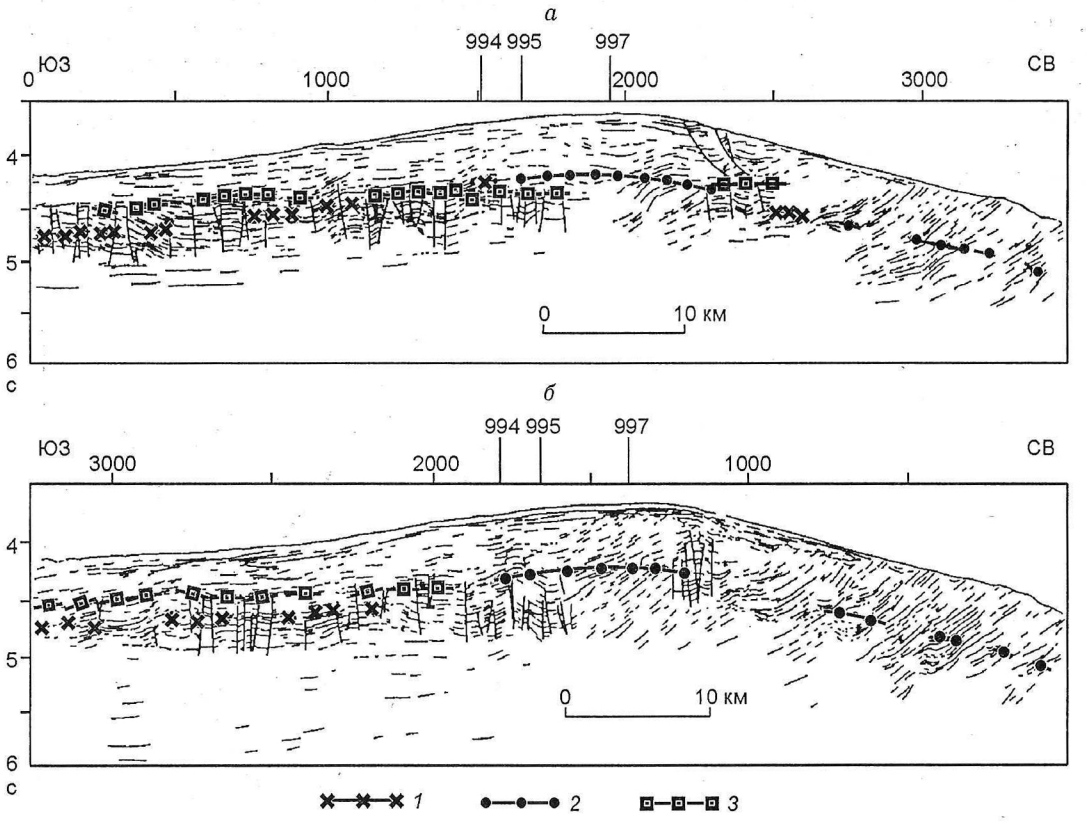


Рис. 4. Интерпретационные временные разрезы по сейсморазведочным профилям 11 (*а*) и 12 (*б*) (положение профилей см. рис. 3).

1 — подошва зоны стабильности газовых гидратов (теоретическая); *2* — положение отражающего сейсмического горизонта BSR; *3* — яркий отражающий горизонт вблизи верхней границы зоны с многочисленными разломами. Слева — двойное время (с), [16].

Эти данные свидетельствуют в пользу того, что тектонические факторы являются вполне благоприятными для процессов миграции флюидов в этом районе.

Гидрогеологический и структурный контроль. Гидрогеохимические данные показывают наличие диффузионного выравнивания хлорности в интервале от дна до поддонной глубины около 200 м. Хлорность уменьшается почти линейно от верхней границы гидратоносной зоны. В ее пределах наблюдаются многочисленные отрицательные аномалии, обусловленные гидратсодержанием образцов, при пониженном (относительно морской воды) среднем значении хлорности. Ниже гидратоносной зоны хлорность либо слегка увеличивается, либо остается постоянной. Распределение хлорности по разрезу скв. 994, 995 и 997 показано на рис. 5. Эти данные свидетельствуют о наличии обширной зоны опреснения в отложениях хр. Блейк Аутер ниже поддонной глубины 200 м.

Анализ материалов сейсморазведки дает основание предполагать, что скопление газовых гидратов на хр. Блейк Аутер связано с наличием каналов фильтрации, по которым движется поток опресненной газонасыщенной воды. По всей вероятности, пространственное положение этого потока контролируется самой структурой хребта и коррелируется с площадью распространения BSR (26 000 км^2, согласно [22]).

Можно полагать, что зоне с наибольшей интенсивностью потока опресненного флюида должен соответствовать наибольший градиент диффузионного выравнивания хлорности в верхней части разреза. Расчеты градиента хлорности для станций глубоководного бурения, расположенных на профиле, проходящем вдоль оси хребта с северо-запада на юго-восток (табл. 1), показали, что наибольшие значения градиента хлорности в верхней части разреза (−0,16÷−0,22 мМ/м) приурочены к району ст. 994, 995, 997 и 1058 (рис. 6). Именно в этом районе располагается зона разломов в осадочной толще хребта (см. рис. 4). Сопоставляя положение станций бурения и расчетного профиля, можно видеть, что значения градиента хлорности быстро уменьшаются в северо-западном направлении в сторону шельфа и становятся положительными в районе ст. 1055. В направлении океана

Таблица 1. Значения градиента хлорности в отложениях хр. Блейк Аутер [10, 12, 13, 19]

№ п/п	Станция	Интервал поддонных глубин, м	Количество измерений	Градиент хлорности, мМ/м	Ссылка
1	104	0—44	1	−0,068	[10, 15]
2	533	0—160	23	−0,106	[12]
3	994	0—195	>30	−0,216	[13]
4	1055	0—126	35	0,032	[19]
	1057	10—130	14	−0,11	
	1058	5—140	15	−0,22	
	1061	0—380	36	−0,039	

градиент уменьшается значительно медленнее, что предполагает вытянутость зоны опреснения в юго-восточном направлении.

Таким образом, полученные результаты подтверждают наличие гидрогеологического и структурного контроля распространения газовых гидратов в пределах изучаемого скопления.

Гранулометрический контроль. Предположение о гранулометрическом контроле газогидратоносности хр. Блейк Аутер было высказано на основе анализа данных по скв. 533 DSDP, пробуренной на восточном склоне хребта (в его пригребневой части) [1, 2]. Почти весь вскрытый скважиной разрез, начиная с глубины 40 м, характеризуется уменьшением хлорности с глубиной. На этом фоне выделяются три локальные отрицательные аномалии хлорности. Нужно отметить, что эти аномалии отвечают интервалам разреза, где в отложениях возрастает содержание алевритовой фракции и уменьшается количество пелитового материала (гранулометрические фракции были выделены по смер-слайдам) [12].

Наиболее показательны результаты обработки данных гранулометрического анализа по скв. 994, 995 и 997. Осадочная толща, вскрытая скважинами, довольно однородна и представлена глинами и биогенными илами голоценового и верхнеплейстоценового возрастов [13]. Для описания отложений использовалась шкала размерности зерен в осадках К. Уэнтворта и классификация Ф. П. Шепарда [23]. Установлено, что в изученных отложениях преобладают глинистая и алевритовая фракции — сумма всех фракций <0,05 мм составляет почти 100 %. Однако детальный анализ позволил выявить в разрезах скважин два относительно грубозернистых горизонта вблизи поддонных глубин 250 и 400 м [24] (рис. 7). Наиболее значительные и многочисленные аномалии хлорности оказались приуроченными к этому же интервалу поддонных глубин (250—400 м). Гранулометрический контроль распределения гидратов по разрезу проявляется как на уровне пачек, так и на уровне отдельных аномалий хлорности (в большинстве

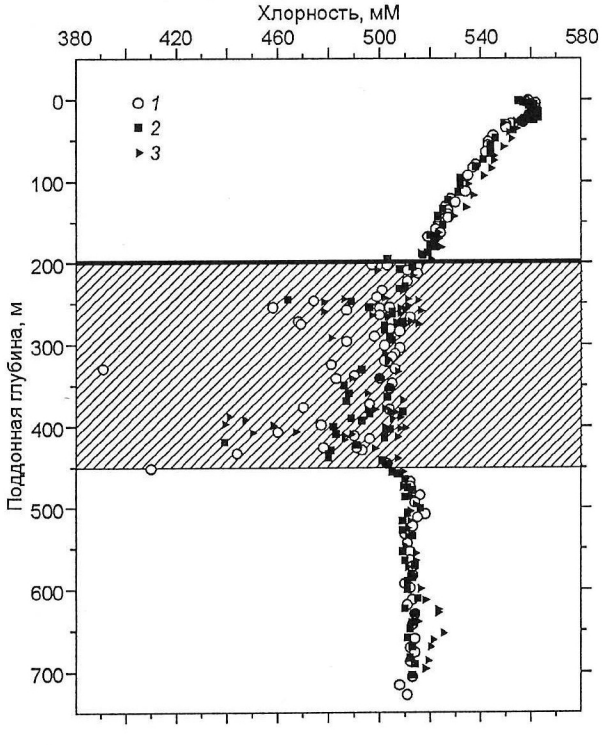


Рис. 5. Распределение хлорности по разрезу на ст. 994, 995, 997 (164-й рейс ODP).

Граница зоны опреснения показана жирной линией; гидратоносный интервал заштрихован. Построено по данным [13]. Станции: *1* — 994, *2* — 995, *3* — 997.

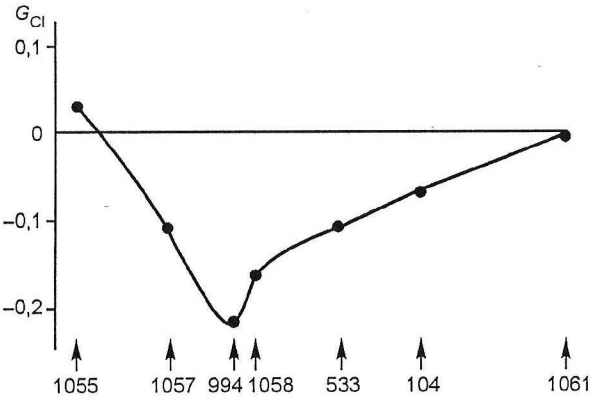


Рис. 6. Изменение градиента хлорности поровой воды (G_{Cl}, мМ/м) в верхней части осадочного разреза хр. Блейк Аутер, вскрытого бурением в 11 и 76-м рейсах DSDP и в 164 и 172-м рейсах ODP по профилю вдоль гребня хребта с северо-запада на юго-восток.

Построено с учетом данных [10, 12, 13, 19]. Стрелки показывают расположение станций глубоководного бурения. Станция 1055 расположена в наиболее мелководной (прибрежной) части хребта, ст. 1061 — в наиболее глубоководной части.

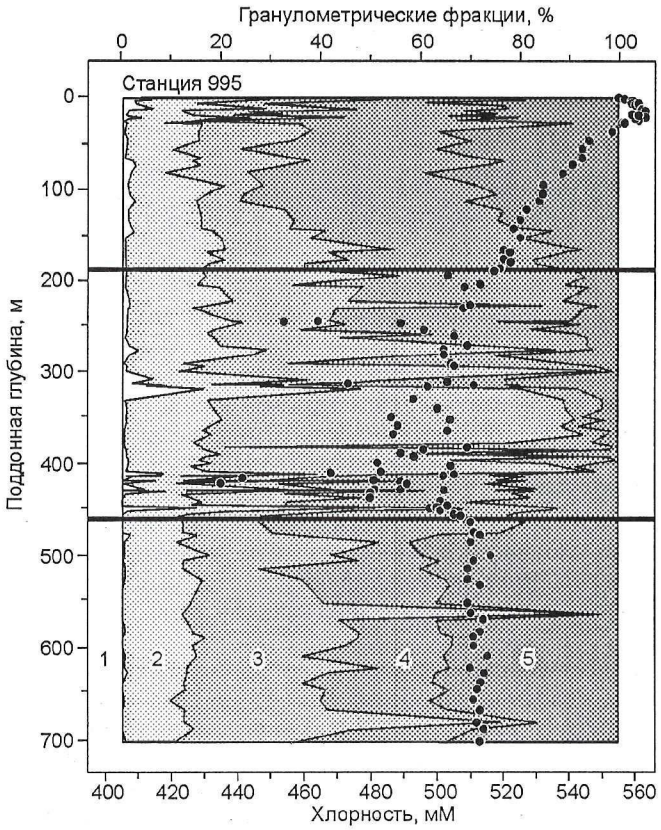


Рис. 7. Распределение гранулометрического состава (линии) и хлорности поровой воды (черные точки, по данным [13]) по разрезу на ст. 995.

Гранулометрические фракции в миллиметрах: 1 = >0,05; 2=0,05—0,01; 3 = 0,01—0,005; 4 = 0,005—0,001; 5 = <0,001. Жирные горизонтальные линии — границы газогидратоносного интервала, по [24].

каждой из шести выделенных групп отложений рассчитывалось среднее значение относительной энтропии (H_r) (табл. 2). Анализ данных по сортировке показал, что отложения изученного разреза характеризуются в целом плохой и умеренной сортировкой по классификации С. И. Романовского [20]. Однако при подсчете среднего значения H_r для каждой из шести выделенных групп, выяснилось, что отложения трех из них (III, IV, V) лучше сортированы — характеризуются умеренной и хорошей сортировкой частиц. В группах IV и V преобладают отложения из гидратсодержащего интервала, а отложения группы III лежат вне зоны распространения гидратов. Причем из 44 исследованных образцов, отобранных из гидратсодержащего интервала скв. 995А, 35 отличаются лучшей сортировкой и, соответственно, принадлежат к группам IV и V.

Грубозернистые горизонты отчетливее проявляются в отложениях ст. 995, более крупнозернистых и лучше сортированных. Тем не менее сопоставление значений H_r с данными о хлорности

случаев). Индивидуальные аномалии хлорности, которые использовались как показатель присутствия газовых гидратов в отложениях, в 44 случаях из 61 (77 %) контролируются относительно грубозернистыми отложениями (рис. 8).

Кумулятивные кривые распределения и гистограммы для каждого образца, построенные по данным скв. 995А, позволили обнаружить гранулометрические параметры, отражающие литологические особенности отложений и подтверждающие гранулометрический контроль распространения гидратов. По форме кумулятивных кривых и гистограмм оказалось возможным выделить шесть групп отложений. Для каждого образца была определена степень сортировки, и для

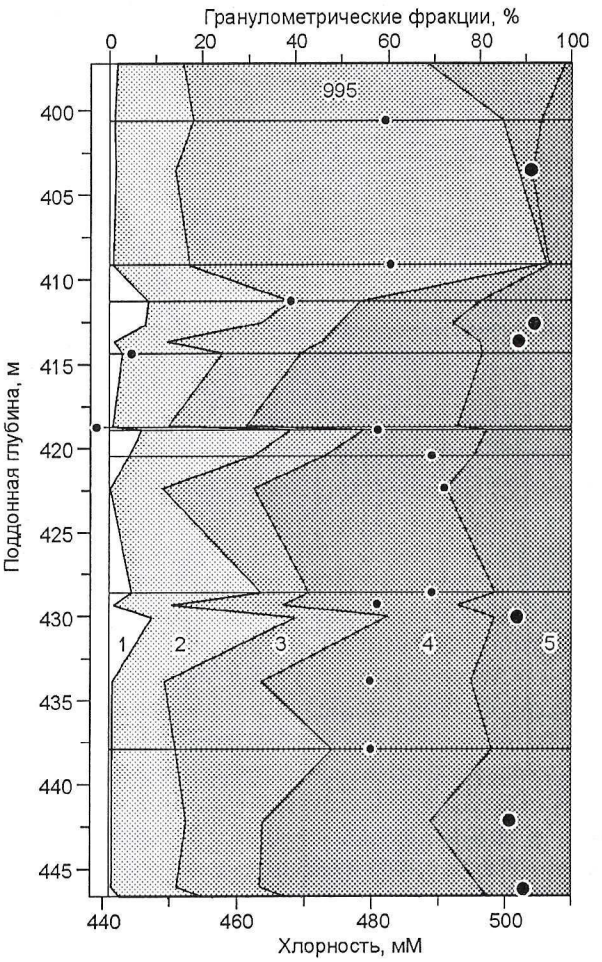


Рис. 8. Распределение гранулометрического состава и хлорности поровой воды в нижней части гидратоносного интервала на ст. 995.

Крупные черные точки — фоновые значения хлорности; мелкие точки — отдельные аномальные значения хлорности. Через аномальные значения, соответствующие относительно грубозернистым отложениям, проведены горизонтальные линии. Ост. усл. обозн. см. на рис. 7.

Таблица 2. Средние значения относительной энтропии (H_r) для различных литологических групп отложений по скв. 995А

Гранулометрический тип отложений	Интервал поддонных глубин, м	Количество образцов	Среднее значение H_r, сортировка отложений
I	1,45—4,7	3	0,574, плохо сортированные отложения
	12,73	1	
	22,15—23,65	2	
	177,65	1	
	282,16	1	
	553,6	1	
	640,32—669,95	4	
	690,85—703,8	2	
		Всего 15; из них в гидратсодержащем интервале —1	
II	6,25—9,45	3	0,528, плохо сортированные отложения
	14,28—18,75	4	
	25,15	1	
	37,65—82,29	7	
	122,6—153,72	5	
	413,7—477,94	13	
	515,55—534,4	3	
	610,91	1	
		Всего 37; из них в гидратсодержащем интервале — 8	
III	20,25	1	0,486, умеренно сортированные отложения
	96,08—113,1	3	
		Всего 4 образца	
IV	28,15—28,55	2	0,487, умеренно сортированные отложения
	166,55—169,55	2	
	180,65—223,18	7	
	231,25—255,15	4	
	263,08	1	
	292	1	
		Всего 17; из них в гидратсодержащем интервале — 13	
V	228,25	1	0,362, хорошо и умеренно сортированные отложения
	259,65	1	
	272,85—276,78	2	
	295—409,2	18	
	564,7	1	
	683	1	
		Всего 24; из них в гидратсодержащем интервале — 22	
VI	486,3—506,61	3	0,517, плохо сортированные отложения
	571—600,07	4	
	623,8—629,1	2	
		Всего 8 образцов	
		Всего 4; из них в гидратсодержащем интервале — 2	

Примечание. Гидратсодержащие интервалы выделены жирными линиями.

поровых вод, показывает, что гидратоносные участки характеризуются тонким переслаиванием более и менее грубозернистых отложений, что отличает их от подстилающих и перекрывающих отложений, не содержащих гидраты. В керне скв. 1058 явные положительные аномалии хлорности поровой воды соответствуют относительно плохо сортированным отложениям (рис. 9), что, вероятно, связано с влиянием других факторов, контролирующих гидратообразование.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что распределение гидратов по разрезу контролируется характером гранулометрического состава: гидратсодержащие отложения характеризуются пониженным содержанием (относительно подстилающих и перекрывающих слоев) тонких фракций и лучшей сортированностью, а следовательно, и лучшей проницаемостью. Но контроль этот неоднозначен и распространение газовых гидратов в этом районе, вероятно, зависит и от других геологических факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования дают основание утверждать, что скопление газовых гидратов в районе хр. Блейк Аутер имеет фильтрационную природу; контролируется в основном

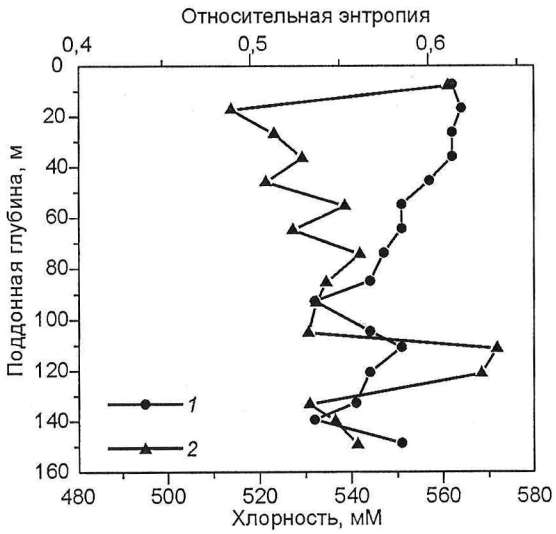


Рис. 9. Хлорность поровой воды (*1*), по [19]; значения относительной энтропии (*2*) по разрезу ст. 1058.

В нижней части разреза отрицательные аномалии хлорности соответствуют лучше сортированным отложениям; положительные аномалии — отложениям с худшей сортировкой.

относительно грубозернистыми отложениями, а также структурно-тектоническими и гидрогеологическими особенностями региона.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 99-05-64247) и программы „Фундаментальные исследования высшей школы в области естественных и гуманитарных наук. Университеты России“ (проект № 992649). Авторы благодарят Б. А. Соколова и Н. В. Устинова за полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А.** Субмаринные газовые гидраты. СПб., ВНИИокеангеология, 1994, 199 с.
2. **Ginsburg G. D., Soloviev V. A.** Submarine gas hydrates. St. Petersburg, VNIIokeangeologia, 1998, 216 p.
3. **Ginsburg G. D., Soloviev V. A.** Methane migration within the submarine gas-hydrate stability zone under deep-water conditions // Marine Geology, 1994, v. 137, p. 59—68.
4. **Кеннет Дж. П.** Морская геология, в 2-х томах. Т. 2 (Пер. с англ.) М., Мир, 1987, 384 с.
5. **Markl R. G., Bryan G. M., Ewing J. I.** Structure of the Blake-Bahama Outer Ridge // J. Geophys. Res., 1970, v. 75, № 24, p. 4539—4555.
6. **Shipley T. H., Buffler R. T., Watkins J. S.** Seismic stratigraphy and geologic history of Blake Plateau and adjacent Western Atlantic continental margin // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., New York, 1978, v. 62, № 5, p. 792—812.
7. **Mountain G. S., Tucholke B. E.** Mesozoic and Cenozoic geology of the Atlantic continental slope and rise // Geologic evolution of the United States Atlantic margin. New York, Van Mostrand Reinold, 1985, p. 293—341.
8. **Markl R. G., Bryan G. M.** Stratigraphic evolution of Blake Outer Ridge // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., New York, 1983, v. 67, № 4, p. 666—683.
9. **Dillon W. P., Popenoe P.** The Blake Plateau Basin and Carolina Trough // The Atlantic continental margin: geology of North America. Geol. Soc. Amer., 1988, v. 1—2, p. 291—328.
10. **Hollister C. D., Ewing J. I., Hathaway G.C. et al.** Initial Reports of the Deep Drilling Project, 1972, v. XI. Washington (U.S. Govt. Printing Office), 1077 p.
11. **Tucholke B. J., Bryan G. M., Ewing J. I.** Gas hydrate horizons detected in seismic-profiler data from the Western North Atlantic // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., New York, 1977, v. 61, № 5, p. 698—707.
12. **Sheridan R. E., Gradstein F. M., Barnard L. A. et al.** Initial Reports of the Deep Drilling Project, 1983, v. 76. Washington (U.S. Govt. Printing Office), 947 p.
13. **Paull C. K., Matsumoto R. J., Wallase P. J. et al.** Proceeding ODP, Initial Reports, 1996, v. 164. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 623 p.
14. **Paull C. K., Matsumoto R. J., Wallase P. J., Dillon W. P. (Eds.).** Proceeding ODP, Scientific Results, 2000, v. 164. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 742 p.
15. **Shipboard Scientific Party.** Sites 102-103-104 — Blake Bahama Outer Ridge (northern end) // Initial Reports DSDP, 1972, v. XI: Washington (U.S. Govt. Printing Office), p. 135—218.
16. **Dillon W. P., Hutchinson D. R., Drury R. M.** Seismic reflection profiles on the Blake Ridge near Sites 994, 995, and 997 // Proceeding ODP, Initial Reports, v. 164. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1996.
17. **Rowe M. M., Gettrust J. F.** Fine structure of methane hydrate-bearing sediments on the Blake Outer Ridge as determined from deep-tow multichannel seismic data // J. Geophys. Res., 1993, v. 98, № B.1, p. 463—473.

18. **ГОСТ 12536-79.** Государственный комитет СССР: грунты. Метод лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., Издательство стандартов, т. 25, 1988.
19. **Keigwin L. D., Rio C. K., Acton G. D. et al.** Proceeding ODP, Initial Reports, 1998, v. 172. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 949 p.
20. **Романовский С. И.** Седиментологические основы литологии. Л., Недра, 1977, 407 с.
21. **Романовский С. И.** Физическая седиментология. Л., Недра, 1988, 239 с.
22. **Dickens G. R., Paull C. K., Wallace P. et al.** Direct measurement of in situ methane quantities in a large gas-hydrate reservoir // Nature, 1997, v. 385, p. 426—428.
23. **Шепард Ф. П.** Морская геология. Издание 3-е (Пер. с англ.) Л., Недра, 1976, 488 с.
24. **Ginsburg G., Soloviev V., Matveeva T., Andreeva I.** Sediment grain-size control on gas hydrate presence, sites 994, 995, and 997 // Proceeding ODP, Scientific Results, v. 164. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 2000, p. 237—245.

Поступила в редакцию
23 апреля 2001 г.