

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.837:550.84.09

**К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ АНОМАЛИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО (*Японское море*)**

**Б.А. Буров, А.И. Обжиров, А.И. Гресов, А.С. Саломатин, Е.В. Мальцева,
Ю.А. Телегин, И.Г. Югай, А.В. Яцук**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

Представлены результаты измерений концентрации метана в придонном слое воды и верхнем слое донных осадков, а также результаты гидроакустических исследований метановых факелов на шельфе, примыкающем к материковому склону, в районе Японского моря, в котором ранее были зафиксированы Шумановские резонансы в электрическом поле на глубинах материкового склона 500 м, 1000 м и 2000 м. Феномен регистрации Шумановских резонансов на столь значительных глубинах объясняется эффектом увеличения более чем в 25 раз удельного сопротивления слоя осадков глубиной около 2000 м, значительная часть порового пространства в котором заполнена свободным метаном. Предложен способ определения глубины залегания источников метана, формирующих аномально высокие концентрации этого газа в донных осадках или придонном слое воды на глубоком шельфе. Способ основан на регистрации Шумановских резонансов при измерениях естественного электрического поля Земли на последовательности увеличивающихся глубин в прилегающих областях материкового склона.

Свободный метан в порах донных осадков, метановый факел, электропроводность донных осадков, Шумановские резонансы в электрическом поле Земли.

**FORMATION OF METHANE CONCENTRATION AND ELECTROMAGNETIC-FIELD
ANOMALIES IN SOUTHWESTERN PETER THE GREAT GULF (*Sea of Japan*)**

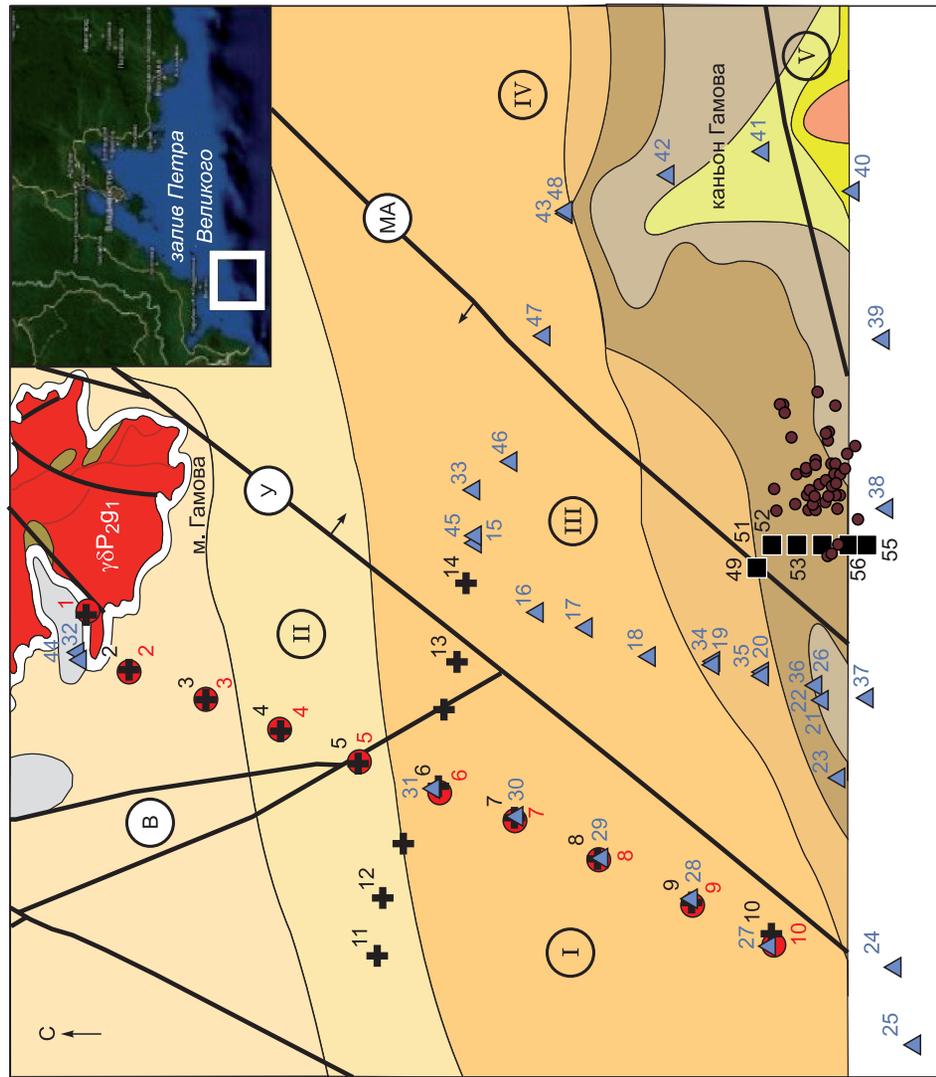
**B.A. Burov, A.I. Obzhirov, A.I. Gresov, A.S. Salomatina, E.V. Maltseva,
Yu. A. Telegin, I.G. Yugai, and A.V. Yatsuk**

We report methane concentrations in the bottom water layer and the upper layer of bottom sediments and the results of acoustic explorations of methane seeps on the shelf bordering the continental slope of the Sea of Japan region, in which electromagnetic Schumann's resonance oscillations were earlier recorded at continental-slope water depths of 500, 1000, and 2000 m. The occurrence of Schumann's resonances at such great depths is explained by an increase (a factor of more than 25) in the electrical resistivity of a ~2000 m thick sediment layer with the pore space largely filled with free methane. A new method is proposed for determining the depth of the sources of anomalous concentrations of methane in bottom sediments or in the bottom water layer on a deep shelf. The method is based on recording Schumann's resonances during measurements of the natural electric field at a series of increasing depths in areas bordering the continental slope.

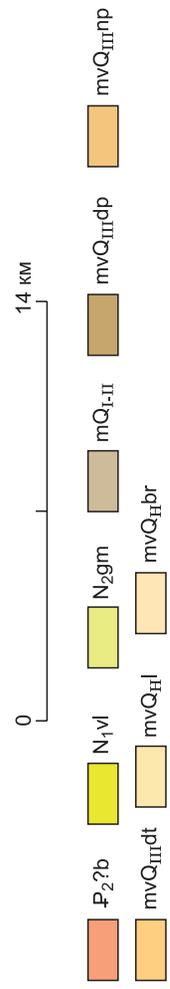
Free methane in the pore space of bottom sediments, methane seep, electrical conductivity of bottom sediments, Schumann's resonances in the Earth's natural electric field

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследования пространственного распределения и временной изменчивости содержания метана в водном слое юго-западной части залива Петра Великого проводились лабораторией газогеохимии Тихоокеанского океанологического института (ТОИ) ДВО РАН с 2002 по 2013 год. Результатами этих исследований стали решения таких экологических задач, как обнаружение природных источников загрязнения вод метаном в этой части залива [Мишукова и др., 2009] и оценка пространственного и вре-



Сис-тема	Отдел	Индекс	Колонка	Мощ-ность, м	Описание
Пермская	Ниж-ний	P ₁₋₂ б		500	Решетниковская свита. Песчаники, алевролиты, углистые аргиллиты, туфопесча-ники, конгломераты
	Верхний	P ₂ br		300	Барашевская свита. Туфы, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, известняки
Палео-ген	Эоцен	P ₁₋₂ nz		90	Назимовская свита. Алевролиты, аргиллиты, угли-стые песчаники, бурые угли, туффиты, в основании конгло-мератобрекчи
		P ₂ zs		1060	Зайсановская свита. Лейкобазальты субщелочные, андезитобазальты альбитизиро-ванные, андезиты, дациты, их туфы, туффиты, туфопесча-ники, туфопалевоолиты
Палеогеновая	Эоцен	P ₂ б		150-250	Толща базальтов. Базальты пироксеновые, темно-серые
		N _{1a}		150-300	Толща аргиллитов. Аргиллиты, конгломераты
		N _{1vI}		250-400	Валентиновская свита. Диатомиты, диатомовые алевро-литы с прослоями и линзами песчаников, туфопесчаников, туфодиатомитов, туффитов, из-вестняков
Неогеновая	Плиоцен	N _{2gm}		150-300	Гамовская свита. Диатомовые аргиллиты, туф-фиты, туфопесчаники, извест-няки, мергели, в основании конгломераты



Станции (номера) отбора проб придонной воды и донных отложений:

- 2008 г.
- 2009 г.
- 2010 г.
- 2011 г.
- гидроакустические аномалии (факелы)

Рис. 1. Геологическая карта района исследований и стратиграфическая колонка юго-восточной части Хасанской структурно-формационной подзоны [Государственная..., 2002a]:

МА — разлом Муравьева-Амурского, У — Уссурийский разлом, В — Виноградовская динамозона Западно-Приморского разлома. I—V — номера тектонических блоков (III — грабен Амурского залива). Стрелками указаны направления падения разломов. Цифрами обозначены станции отбора проб придонной воды (1—48) и донного грунта (49—56). На врезке — расположение района работ в заливе Петра Великого Японского моря.

менного распределения потоков метана, вовлеченных в газообмен между атмосферой и акваторией залива [Мишукова и др., 2013]. Важное значение для понимания геохимических и биологических процессов в этом районе имеет полученное на основе многолетних измерений усредненное распределение метана в водной толще, а также усредненные его концентрации в приповерхностном $C_{\text{ср.п.}} = 2.2$ нМ/л и придонном $C_{\text{ср.д.}} = 3.6$ нМ/л, слоях воды [Мишукова и др., 2007].

В качестве объекта настоящего исследования был выделен район аномальной концентрации метана в придонном слое воды, расположенный между Большим Гамовским каньоном и следующим за ним в западном направлении более мелким каньоном. Особый интерес к этому району связан с измерениями естественного электрического поля, которые проводились на материковом склоне между двумя упомянутыми каньонами в 1984—1985 гг. [Буров, Дрога, 1988]. В результате этих измерений были зарегистрированы устойчивые колебания с частотами первых трех шумановских резонансов на глубинах 500, 1000 и 2000 м, что возможно только при условии чрезвычайно низкой электрической проводимости донных осадков. Расчеты показывают (см. Приложение), что для проникновения электрического поля третьего шумановского резонанса (частота 21 Гц) в точку измерения на материковом склоне на глубине 2000 м из ближайшего района шельфа, выделенного нами как район исследования, с амплитудой, превышающей среднеквадратичное напряжение шума измерительного усилителя в 2 раза, усредненное удельное сопротивление двухкилометровой толщи донных осадков должно быть не менее 255 Ом·м.

Феномен столь высокого удельного сопротивления донных осадков любого состава может реализоваться только в случае заполнения существенной части их порового пространства диэлектриком, в качестве которого на указанных выше глубинах моря в донных осадках могут оказаться либо газ, либо нефть. Образование высокоомного солевого слоя мощностью 2000 м в районе измерений электрического поля было исключено после того, как в 2002 г. обнаружено наличие повышенной концентрации метана в придонной воде в этом районе [Государственная..., 2002 б]. После фиксации этого факта рабочей гипотезой механизма существенного уменьшения электропроводности донных осадков стала гипотеза о заполнении порового пространства донного грунта свободным метаном (пузырьками). Это возможно, если концентрация растворенного CH_4 в поровых водах является предельной, т.е. поровые воды перенасыщены метаном. В таком случае нарушение равновесия между потоком метана, поступающим из донных осадков, и потоком, уходящим в виде раствора в водный слой и далее уносимым течением (например, из-за замедления течения), должно приводить к пузырьковому выходу (эманации) CH_4 из пор донного грунта в водный слой. Такие выходы пузырьков метана, называемые метановыми факелами, или сипами, хорошо регистрируются с помощью эхолотов.

Основная цель газогеохимических и гидроакустических исследований в описанном выше районе состояла в подтверждении гипотезы пузырьковой эманации метана из донных осадков в водный слой в виде пульсирующих газовых факелов. Подтверждением этой гипотезы служат также и эксперименты по заполнению порового пространства донных осадков свободным метаном, что и объясняет высокое электрическое сопротивление слагающих дно пород в районе пузырьковой эманации метана. При этом речь идет о заполнении пор газом в слое донных пород глубиной порядка 2000 м, поскольку поры донных осадков должны быть заполненными диэлектриком на всем пути распространения электромагнитных колебаний шумановских резонансов — от поверхности дна до глубины установки измерительной антенны. В этой связи большое значение приобретает вопрос определения вероятного газоматеринского источника газа и его пространственного положения. Изучению этого вопроса уделено особое внимание в разделе геологической характеристики района исследований.

Первые экспериментальные подтверждения наличия газовых факелов в интересующем нас районе уже получены другими исследователями при проведении в этом районе эхолотной съемки дна [Григорьева, Ивин, 2015]. Однако в указанной работе факт обнаружения пузырьковой эманации газов констатируется без анализа возможных источников газа и их пространственной локализации.

Результаты исследований, подтверждающие сформулированную выше гипотезу, представлены в данном сообщении.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований (рис. 1) представляет собой сложнодислоцированную структуру, сложенную палеозойскими терригенными, вулканогенно-карбонатно-терригенными отложениями, магматическими образованиями складчатого фундамента и эффузивами, вулканитами и осадочными отложениями кайнозойского чехла [Объяснительная записка..., 2000; Государственная..., 2002a].

Стратиграфия и литология. Основание складчатого фундамента района исследований представлено нижневерхнепермскими песчаниками, алевролитами, аргиллитами, углистыми аргиллитами, туффитами, известняками и конгломератами решетниковской ($P_{1-2}rs$) и барабашской (P_2br , пос. Барабаш) свит мощностью 500 м и 300 м, прорванными штоками, дайками и жилами гранитов, пегматитов, диорит-порфиоров, тоналитов, гранодиоритов и грейзенов верхнепермского гамовского ($\gamma_2 P_2g$, п-ов Гамова) и других более поздних комплексов [Геология..., 1969; Объяснительная записка..., 2000].

На породах фундамента с размывом и угловым несогласием залегают палеоцен-эоценовые отложения угленосной назимовской ($P_{1-2}nz$, мыс Назимова) свиты мощностью до 100 м, на которых залегают образования зайсановской (P_2zs , с. Зайсановка) свиты, представленной лавами базальтов, андезитов, линзами туфоконгломератов мощностью до 1060 м, и толща базальтов ($P_2?b$) мощностью 150—250 м. Неогеновые отложения района представлены толщей аргиллитов (N_1a), отложениями валентиновской (N_1vl , пос. Валентин) и гамовской (N_2gm) свит суммарной мощностью 300—700 м (рис.1).

Четвертичные отложения представлены песками, гравийниками, алевролитами с линзами торфа, глинами материкового склона и внешнего шельфа (mQ_{I-II} — нижнее—среднее звенья нерасчлененные; $mvQ_{III}dp$ — лазовский горизонт, древнепетровская толща; общая мощность до 200 м); песками внешней зоны шельфа ($mvQ_{III}np$ — черноручьинский горизонт (верхняя часть) — партизанский горизонт (нижняя часть), новопетровская толща нерасчлененная мощностью до 5 м); песками, алевролитами с растительными остатками среднего шельфа ($mvQ_{III}dt$ — партизанский горизонт, средняя часть, древнетихоокеанская толща мощностью до 10 м) и песками, алевролитами, галечниками, гравийниками, глинами прибрежной зоны шельфа (mvQ_{IV} — южноприморский горизонт, нижняя часть голоцена (пребореальный и бореальный периоды); $mQ_{IV}br$ — южно-приморский горизонт, средняя часть, барабашевские слои (атлантический период голоцена) мощностью до 15 м). В целом мощность кайнозойского чехла с четвертичными осадками в районе исследований достигает двух и более километров [Геология СССР..., 1969; Объяснительная записка..., 2000; Государственная..., 2002a; Карнаух и др., 2007].

Тектоника. Район исследований расположен в юго-восточной части Хасанской структурно-формационной подзоны Западно-Приморской зоны Южно-Приморской области палеозойской складчатости [Варнавский, 1988] и приурочен к площади сочленения структурообразующих глубинных разломов северо-западного (Западно-Приморский) и северо-восточного (Уссурийский и Муравьева-Амурского) простирания, разделяющих ее на пять тектонических блоков. С последними разломами связано формирование грабена Амурского залива [Геология..., 1969; Угольная база..., 1997; Объяснительная..., 2000], часть которого, представленная тектоническим блоком III (см. рис. 1), является основной площадью настоящих исследований. Ограничивающие геологические структуры (тектонические блоки) разломы осложнены опережающими их нарушениями. Ширина отдельных зон дробления нарушений, транзитно-проходящих в кайнозойский чехол, достигает 50—100 м. При этом в приразломных зонах отмечается чередование участков растяжения (дегазации) и сжатия (газовых экранов), сопровождаемое чередованием зон с показателями проницаемости 0.1—1, 1—10, 10—50 и более 50 мД [Геология..., 1969; Объяснительная записка..., 2000; Карнаух и др., 2007; Гресов и др., 2009].

Угленосность района исследований представлена слоями углисто-глинистых сланцев, углистых аргиллитов (мощностью до 22.4 м), пропластками и пластами высокозольных углей (мощностью до 0.5 м) решетниковской свиты. Максимальной угленосностью характеризуются отложения назимовской свиты палеогена, в которой установлены 12 пропластков и пластов угля марочного состава БД-Д суммарной мощностью 12 м, в том числе трех пластов угля с мощностью от 0.7 до 5.9 м (см. рис. 1). В нижнеэоценовой толще аргиллитов присутствуют пропластки лигнитов мощностью 0.1—0.3 м [Геология..., 1969; Угольная база..., 1997].

Газоносность. В составе газа углистых пород и угольных пластов установлены CH_4 (до 84 %) и его гомологи (до C_3 , в сумме до 1 %), CO_2 (до 30 %), H_2 (до 3—5 %), N_2 и Ar (в сумме до 95 %). Метаноносность углей грабена Амурского залива (стадии метаморфизма O_3-I) на максимальных глубинах их залегания достигает 10—12 м³/т, углистых пород — 1—4 м³/т [Угольная база..., 1997; Гресов, Обжиров, 2006; Гресов и др., 2009], т. е. район исследований характеризуется высоким метаноресурсным потенциалом, связанным с залежами углей и углистых пород.

Следует отметить, что район работ расположен в пределах прогнозной нефтегазоносной площади залива Петра Великого [Геология..., 1969; Геологическая карта..., 1986; Объяснительная записка..., 2000]. В процессе исследований установлена высокая углеводородонасыщенность и метанонасыщен-

ность донных осадков ($C_2 + C_5$ до 19 и C_1 — до 884 $\text{см}^3/\text{м}^3$). При этом в ряде случаев в донных осадках (на двух станциях) в пределах юго-восточного крыла грабена Амурского залива установлены углеводородные газы с показателями молекулярной массы углеводородной фракции 17.12—17.24 г/моль, характерными для газоконденсатных скоплений и залежей [Гресов, 2011; Гресов и др., 2016].

Таким образом, газоматеринскими источниками района исследований являются разновозрастные углисто-глинистые сланцы, углистые аргиллиты и алевролиты, пропластки и пласты торфов, лигнитов, бурых и переходных к каменным углей, а также предполагаемые газовые, конденсатно-газовые скопления и залежи пород фундамента и кайнозойского чехла.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Исходя из названной во введении цели исследования, сеть станций отбора проб воды была размещена на исследуемой акватории таким образом, чтобы охватить измерениями как выделенный район исследований, так и прилегающие к нему площади; при этом обеспечив отбор проб воды на равномерно уменьшающемся расстоянии от линий простирания разломов. Определение концентрации метана в придонной воде на обрамляющей исследуемый район акватории позволяет в первом приближении установить границы района, в котором целесообразно проведение дополнительных исследований (таких как определение концентрации метана в пробах донного грунта и акустическая съемка), а также оценить роль тектонических разломов в создании аномально высоких концентраций метана в придонном слое воды исследуемой акватории.

Особое внимание уделено измерениям концентрации метана в каньонах, ограничивающих район исследований по долготе (станции 34—37 и 40—43), поскольку каньоны, как правило, рассматриваются геологами и геофизиками как признаки тектонических нарушений, в которых формируются пути выхода глубинных газов. Для оценки вероятности пузырькового выхода метана из донных осадков в водный слой газогеохимическими методами, были измерены концентрации метана в поровой воде, отобранной из верхнего слоя донных осадков на станциях 49—56, расположенных по меридиану $131^{\circ}11'$ в.д. на глубинах моря от 111 м до 150 м, т.е. параллельно станциям с максимальной концентрацией метана в придонной воде и на малом удалении от линии их простирания (около 1.5 км восточнее).

Схема станций отбора проб из придонного слоя воды и верхнего слоя донных осадков нанесена на геологическую карту [Государственная..., 2002a] на рис. 1.

Концентрация метана в придонном слое воды (в пробах, отобранных на высоте 2—3 м над дном) оперативно измерялась методом хроматографического анализа по методике «Head Space» [Хахенберг, Шмидт, 1979]. Хроматографический анализ проводился на газовом хроматографе «ЭХО — EW» (чувствительность по метану $10^{-4}\%$) через интервал времени не более 5 ч после отбора пробы. Оперативные измерения дублировались (кроме измерений на станциях 1—10 в 2008 и 2009 гг.) по прибытии судна во Владивосток (через 10 сут) путем повторного хроматографического анализа газов, извлеченных из дубликатов проб воды методом вакуумной дегазации. Дублирующий анализ растворенных в воде газов выполнен на газовом хроматографе «Кристал-Люкс 4000 М». Точность определения концентрации $10^{-5}\%$.

В следующем разделе представлены результаты измерений концентрации метана в газовых смесях, полученных методом вакуумной дегазации (кроме измерений 2008 и 2009 гг. на станциях 1—10), поскольку этот метод обеспечивает более полное извлечение газов из водных растворов.

Отбор проб воды из придонного слоя производился с помощью батометров Нискина емкостью 5 л. Пробы отбирали в сосуды емкостью 275 мл для оперативного анализа по методике «Head Space», и в сосуды емкостью 500 мл для последующей вакуумной дегазации и повторного анализа. Пробы донного грунта отбирали с помощью прямооточной пробоотборной трубки. После вскрытия трубки керн донного грунта делили по глубине на сегменты высотой 5 см, из которых с помощью шприцев пробы грунта перемещали в стеклянные пузырьки емкостью 75 мл, предварительно заполненные насыщенным солевым раствором. После переноса 15—20 см^3 грунта из керна, пузырьки герметизировали.

Для подтверждения вывода о наличии свободного метана в поровом пространстве донных осадков в интересующем нас районе, были предприняты попытки обнаружить всплывающие со дна пузырьки метана акустическими методами. Для этого в квадрате, охватывающем станции отбора проб донного грунта (рис. 2), была выполнена акустическая съемка с борта НИС «Импульс» в июле и сентябре 2015 г. с помощью мобильного комплекса, основу которого составляют эхолот Furuno (рабочие частоты 50 и 200 кГц, ширина диаграммы направленности 24 и 10° соответственно) и система цифровой регистрации эхо-сигналов.

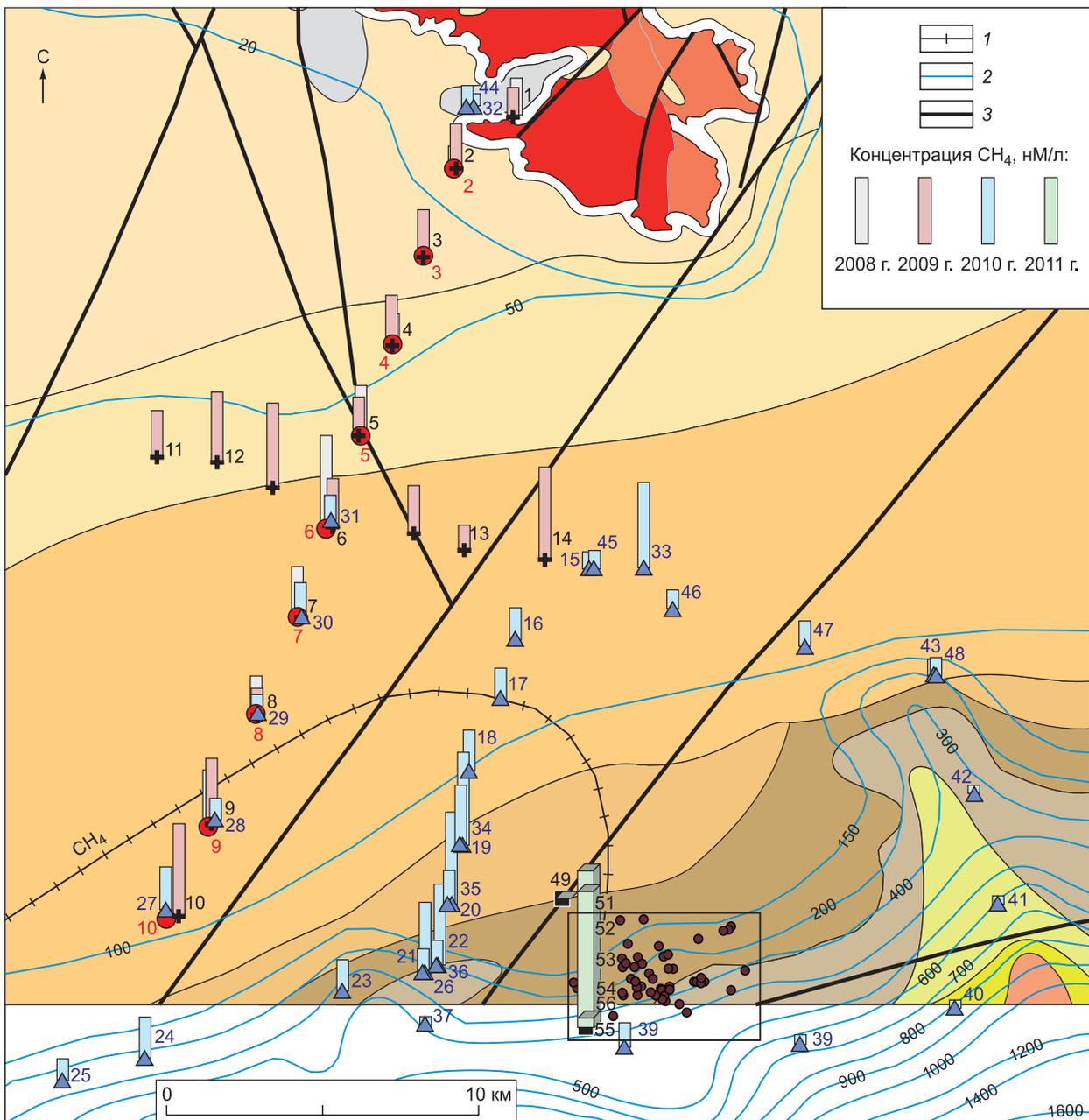


Рис. 2. Результаты газогеохимических исследований в придонном слое воды и верхнем слое донных осадков, нанесенные на геологическую карту [Государственная..., 2002б].

Квадратом выделена площадь гидроакустической съемки; точками нанесены наиболее крупные метановые факелы. 1 — гидрохимическая аномалия CH_4 в придонной воде, 2 — изобаты (м), 3 — тектонические нарушения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты определения концентраций метана, растворенного в пробах воды, отобранных из придонного слоя на станциях, указанных на карте рис. 1, представлены на диаграммах рис. 2, 3. Концентрации метана, измеренные в поровой воде донных осадков, керны которых отобраны на станциях 49—56, представлены на диаграммах рис. 2 и 4.

Следующие друг за другом диаграммы (см. рис. 3) концентраций метана в придонном слое воды имеют близкие параллельные участки внутри выделенного района исследований. Это участки станций 19—22 и 33—36 (см. рис. 1), концентрация метана на которых явно выделяется на фоне других станций и является аномально высокой по сравнению с характерной для этого района концентрацией метана в придонной воде (3.6 нМ/л).

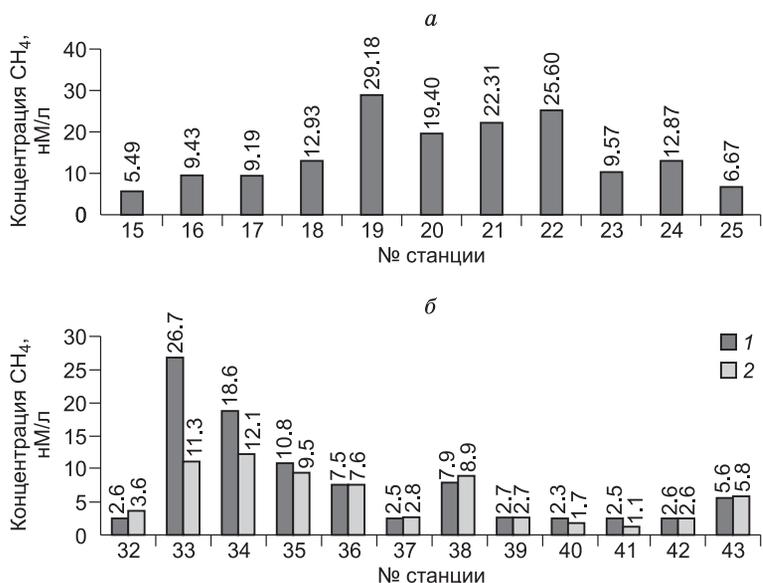
Рис. 3. Концентрация метана в придонном слое воды на станциях разреза 15—25 (а), 33—43 (б).

1 — метод вакуумной дегазации; 2 — метод «Head Space».

Подтверждением закономерного характера anomalно высоких концентраций метана в придонной воде на станциях 19—22 и 33—36 является anomalно высокая концентрация метана в поровой воде донных осадков на пространственно близких к ним станциях 52, 55 и 56 (см. рис. 2, рис. 4).

Измерения концентрации метана в придонном слое воды на станциях 45—48 выполнены с целью определения простираения района anomalно высоких концентраций метана по широте. Из низких концентраций CH_4 на этих станциях (рис. 5) видно, что район anomalно высоких концентраций в северном направлении не выходит за рамки границы, проходящей через станции 45—48.

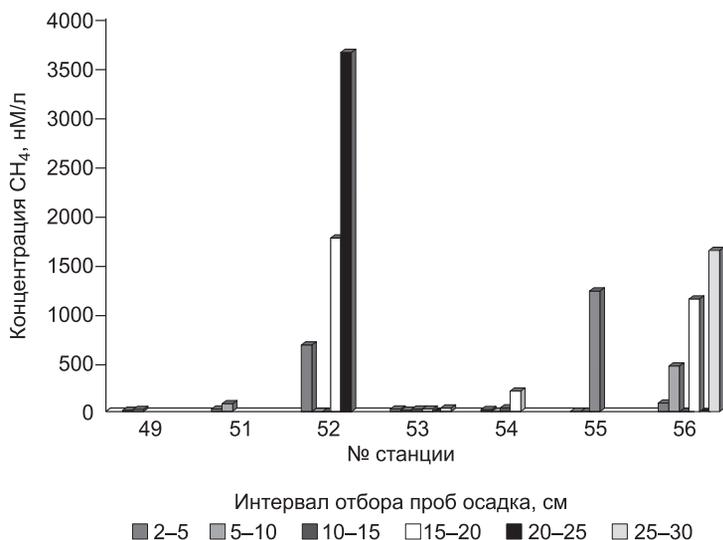
Гидроакустическая съемка с НИС «Импульс» проводилась на ходу судна. Было зарегистрировано 56 газовых факелов (ГФ) с поперечными размерами менее 10 м в интервале глубин 110—243 метра. На рис. 6 приведен пример эхограммы ГФ.



АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленные результаты измерений концентрации метана в придонном слое воды (см. рис. 2) позволяют сделать некоторые выводы уже на основе пространственного распределения измеренных концентраций. Во-первых, в юго-западной части залива Петра Великого выбранный нами для углубленного исследования участок, расположенный на восточном борту малого каньона, уверенно выделяется anomalно высокими концентрациями метана в придонной воде, которые достигают наибольших значений на станциях с 19 по 22 и с 33 по 36. Во-вторых, существенно меньшие значения концентраций метана в придонной воде каньонов (станции с 34 по 37 и с 40 по 43) по сравнению с концентрациями на ближайших станциях, расположенных вне углублений каньонов, говорят о том, что каньоны не играют существенную роль, как пути выхода глубинного метана к поверхности донных осадков в данном районе.

Выполненные на станциях 49—56 измерения концентрации метана в верхнем слое донных осадков показали очень высокие значения на всех горизонтах отобранных кернов (см. рис. 2, 4). Как видно из рис. 4, концентрация метана возрастает с увеличением глубины в осадках, оставаясь тем не менее далекой от концентрации насыщения (почти на 3 порядка меньше). Даже с учетом потери значительной



части растворенного в поровой воде метана в процессе поднятия на борт судна негерметичной прямоотборной трубки и в процессе переноса пробы из трубки в стеклянные емкости, отличие на 3 порядка от концентрации насыщения не подтверждает гипотезу о наличии свободного метана в порах донных осадков, керны которых были проанализированы. Однако гидроакустическое зондирование исследуемого района, выполненное через 4 года после газохроматографического анализа проб донных осадков, показало наличие 56 факелов и, следовательно,

Рис. 4. Концентрация метана в верхнем слое донных осадков на станциях 49—56.

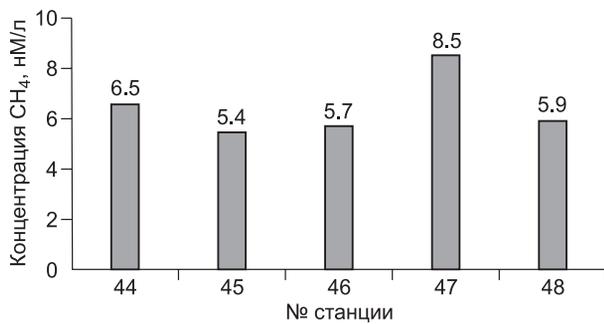


Рис. 5. Концентрация метана в придонном слое воды на станциях 44—48.

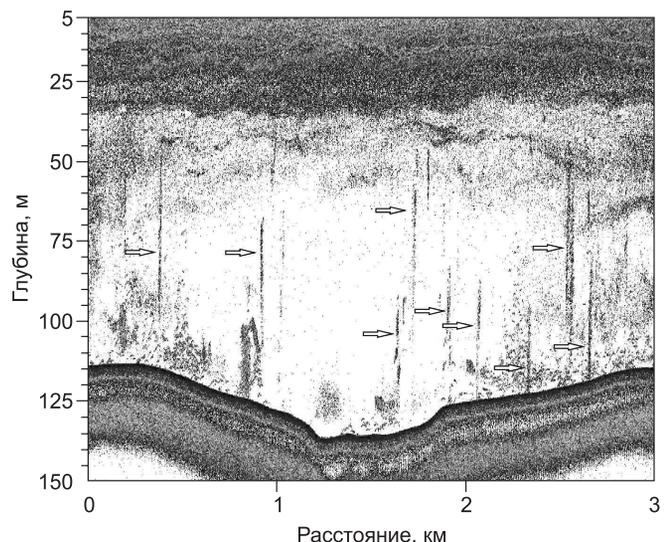
присутствие свободного метана в донных осадках этого района. Из сопоставления двух вышеназванных экспериментальных результатов следует, что пузырьковая эманация метана из осадков в водный слой в исследуемом районе не является постоянной, а носит периодический (пульсирующий) характер.

Анализ результатов, газеохимических и гидроакустических исследований, направленных на обнаружение свободного метана в поровом пространстве донных осадков исследуемого района, демонстрирует недостаточность только газеохимических методов оценки вероятности появления свободного метана в порах донных осадков. В то же время гидроакустические методы обнаружения свободного метана, предполагающие прямое обнаружение пузырьков газа в виде газовых факелов, также требуют проведения дополнительных газохромографических анализов, с целью определения газового состава пузырьков. К тому же, сам факт регистрации метановых факелов не содержит информации о глубине залегания источников метана, питающих эти факелы, а эта информация является ключевой для целей геологической разведки залежей углеводородного сырья в море. Для районов, прилегающих к материковому склону, удобным методом определения максимальной глубины залегания источников метана для обнаруженных гидроакустическими методами метановых факелов может служить измерение естественного электрического поля Земли в диапазоне шумановских резонансов (6—75 Гц) на последовательности увеличивающихся глубин на материковом склоне. Этот диапазон колебаний естественного электромагнитного поля Земли ранее не использовался в разведочной геофизике из-за малых амплитуд колебаний на частотах шумановских резонансов у поверхности Земли. Электромагнитные волны естественного электромагнитного поля Земли на частотах, превышающих 1 Гц, уже у земной поверхности имеют настолько малую амплитуду, что, пройдя через слой проводящей морской воды глубиной более 100 м, испытывают дополнительное затухание в этом слое, которое не позволяет далее использовать волны этих частот для зондирования донных осадков. То есть, после прохождения слоя морской воды амплитуды естественного электрического поля Земли на частотах, превышающих 1 Гц, при дальнейшем распространении по пути к углеводородной залежи в проводящих донных осадках, уменьшаются ниже уровня собственных шумов регистрирующей аппаратуры.

Однако выводы о недостаточной интенсивности электромагнитного поля шумановских резонансов построены на расчетах, в которых слой осадков, вмещающий углеводородную залежь, считается непроницаемым как для вещества самой залежи, например, нефти, так и для выделяемого залежью газа — метана [Брэйди и др., 2009]. По этой причине в расчетах удельное сопротивление слоя осадков над залежью принималось равным удельному сопротивлению пород, слагающих донные осадки, поры которых заполнены хорошо проводящей морской водой. Это удельное сопротивление, как правило, входит в диапазон значений 1—10 Ом·м.

В действительности большинство осадочных пород в той или иной мере являются проницаемыми для выделяемого углеводородной залежью метана (это подтверждается многочисленными измерениями концентрации метана в верхнем слое донных осадков над разведанными месторождениями углеводородов [Николаева и др., 2009]). В случае высокой проницаемости слагающих дно пород или высокого пластового давления метана в залежи этот газ поднимается по порам пород донных осадков, растворяясь в поровой воде до насыщения, после чего начинает мигрировать к поверхности донных осадков в виде пузырьков, частично вытесняя из порового пространства воду или превращаясь в гидрат метана и увеличивая, таким образом, удельное

Рис. 6. Эхограмма газовых факелов (отмечены стрелками) в юго-западной части залива Петра Великого.



сопротивление донных осадков. Внешним проявлением этого процесса являются метановые факелы, которые, например на северо-восточном шельфе о. Сахалин, пространственно совпадают с нефтеносными провинциями. Представленная в Приложении численная оценка удельного сопротивления донных осадков, значительная часть пор в которых заполнена свободным метаном, дает величину порядка 250 Ом·м. Экспериментальным доказательством описанного выше механизма увеличения удельного сопротивления донных осадков и возможности определения глубины залегания источника метана для метановых факелов, действующих в прилегающих к материковому склону районах шельфа, являются результаты данной работы и результаты, представленные в более ранней работе [Буров, Дрога, 1988].

Отметим также, что экспериментальным подтверждением принципиальной возможности возрастания на несколько порядков удельного сопротивления породы при вытеснении из ее пор воды в процессе заполнения этих пор нефтью являются лабораторные эксперименты, выполненные на известняках [Sweeney, Jennings Jr., 1960] и песчанике [Wei, Lile, 1991]. Теоретическое объяснение результатов этих экспериментов дано в статье [Zhou et al., 1996].

Как показали измерения естественного электрического поля в море [Буров, Дрога, 1988], рассматриваемый механизм увеличения сопротивления донных осадков должен работать во всей толще осадков, от поверхности до глубины залегания углеводородной залежи, и для всех видов углеводородных полезных ископаемых, поскольку все они выделяют метан. Результаты анализа, проведенного в разделе «Геологическая характеристика района исследований», приводят к заключению, что наиболее вероятным источником свободного метана в толще донных осадков исследованного района являются угольные залежи, пласты которых по результатам стратиграфических изысканий прослеживаются до глубин 1800—2400 м (см. рис. 1).

ВЫВОДЫ

Как следует из результатов гидроакустической съемки (см. рис. 6), исследуемый район действительно является зоной пузырьковой разгрузки метана, в которой наблюдаются многочисленные слабые газовые факелы с поперечными размерами меньше 10 м. Результаты газогеохимических исследований (см. рис. 4) приводят к заключению, что пузырьковая эманация метана из донных осадков в водный слой носит пульсационный характер.

Представленные в данной работе результаты газогеохимических и гидроакустических исследований составляют экспериментальное подтверждение гипотезы о заполнении порового пространства донных осадков в выделенном районе исследований свободным метаном, следствием чего является высокое электрическое сопротивление пород, слагающих дно этого района. Усредненное удельное электрическое сопротивление слоя донных осадков глубиной 2000 м от поверхности дна, содержащего в пространстве пор пузырьки метана, имеет величину порядка 250 Ом·м, что, по крайней мере, в 25 раз больше удельного сопротивления донных осадков, поры которых заполнены только морской водой.

Такое сравнительно высокое удельное сопротивление районов шельфа, прилегающих к материковому склону, донные осадки которых насыщены свободным метаном, позволяет регистрировать естественное электрическое поле Земли в диапазоне шумановских резонансов при установке приемных антенн на поверхности дна на материковом склоне на глубинах порядка 2000 м.

Для районов глубокого шельфа новым способом определения максимальной глубины залегания источников метана, питающих метановые факелы или создающих аномально высокие концентрации метана в донных осадках и придонной воде, может служить регистрация шумановских резонансов при измерениях естественного электрического поля Земли на последовательности увеличивающихся глубин в прилегающих областях материкового склона.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Результаты приближенного расчета напряженности электрического поля третьего шумановского резонанса для глубины 2000 м на материковом склоне Японского моря.

Шумановские резонансы — это постоянно существующие в пространстве между поверхностью Земли и ионосферой колебания электромагнитного поля, которые возбуждаются разрядами молний. Благодаря резонансным свойствам сферического волновода, которыми обладает пространство между поверхностью Земли и ионосферой, электромагнитные колебания сохраняются в этом пространстве продолжительное время на определенных частотах — шумановских резонансах. Три первых шумановских резонанса имеют частоты 7; 14 и 21 Гц (это усредненные значения, которые могут изменяться в зависимости от состояния ионосферы, как правило, в пределах ± 1 Гц).

На основе ранее проведенных натуральных измерений естественного электрического поля на материковом склоне Японского моря, описанных в статье [Буров, Дрога, 1988], выполним расчет удельного сопротивления, которым должны обладать газонасыщенные донные осадки для того, чтобы электриче-



Рис. 7. Схематический геoeлектрический разрез района измерений.

ское поле на частотах шумановских резонансов имело достаточную амплитуду для его регистрации на глубине в осадках около 1900 м. Схематический геoeлектрический разрез района измерений с указанием пространственного положения измерительных антенн представлен на рис. 7.

Вышеупомянутые измерения электрического поля выполнены с помощью усилителей МДМ-типа, среднеквадратичные значения собственных шумов которых на частоте 21 Гц не превышали 160 нВ/√Гц. При измерениях в море сигнал на вход усилителя поступал с кабельной антенны длиной 1000 м. Из перечисленных параметров измерительной аппаратуры следует, что для превышения собственного шума измерительного усилителя в 2 раза, амплитуда сигнала на входе усилителя должна составлять 320 нВ в полосе 1 Гц. Тогда напряженность электрического поля, создаваемого источником сигнала в измерительной антенне, должна иметь амплитуду не менее $320 \text{ нВ}/\sqrt{1000 \text{ м}} = 0.32 \text{ нВ}/\text{м}\sqrt{\text{Гц}}$.

Усредненные по времени суток максимальные значения амплитуд горизонтальных компонент электрического поля первых трех Шумановских резонансов у поверхности Земли, согласно измерениям [Toledo-Redondo et al., 2010], имеют значения 300 нВ/м√Гц. Таким образом, для того, чтобы электрическое поле Шумановских резонансов могло быть зарегистрировано на глубине моря 2000 м с отношением сигнал/шум = 2 необходимо, чтобы затухание амплитуды колебаний на пути от поверхности моря до точки измерения на материковом склоне (точка P, см. на рис. 7) не превысило величину $300/0.32 \text{ нВ}/\text{м}\sqrt{\text{Гц}} = 938$. Коэффициенты затухания электромагнитных колебаний с частотами трех первых Шумановских резонансов в морской воде с соленостью 35 ‰, и в насыщенных морской водой донных осадках представлены в таблице.

Наибольший интерес представляет регистрация третьего резонанса на частоте 21 Гц как наиболее высокочастотного колебания, испытывающего наибольшее затухание на 1 м пути распространения в проводящей среде. Таким образом, наиболее полно оценить изменение удельного сопротивления донных осадков, которое должно произойти при просачивании через них газа, в данном случае можно, анализируя затухание колебаний третьего шумановского резонанса. Электромагнитные колебания шумановских резонансов могли пройти с поверхности моря в точку измерений P на материковом склоне либо через слой воды глубиной 2000 м, либо по пути ABP (см. рис. 7), на котором отрезок AB = 125 м — это средняя глубина района, в котором зарегистрированы газовые факелы, а BP = 8000 м — расстояние в толще газонасыщенных осадков между серединой этого района, определенной на поверхности дна, и точкой измерения P. Используя коэффициент затухания в морской воде электромагнитных колебаний на частоте 21 Гц (см. таблицу), получим, что при распространении вертикально вниз, сквозь слой воды глубиной 2000 м, электромагнитные колебания третьего шумановского резонанса затухнут в $\exp(1.8 \cdot 10^{-2} \cdot 2000) = \exp(36) = 1.3 \cdot 10^{16}$ раз, и их амплитуда составит $8 \cdot 10^{-17} \text{ мкВ}/\text{м}$, что является нерегистрируемой величиной. При распространении по пути ABP, на отрезке AB затухание составит $\exp(1.8 \cdot 10^{-2} \cdot 125) = \exp(2.25) = 10$ раз. Таким образом, для регистрации третьего шумановского резонанса с отношением сигнал/шум = 2 на пути BP = 8000 м затухание не должно превысить $938/10 = 93.8$ раза. Отсюда по формуле $\alpha = (\ln 93.8)/8000 = 4.54/8000 = 5.7 \cdot 10^{-4}$ определяется коэффициент затухания α , которому соответствует удельное сопротивление донных осадков $\rho = 255 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (удельное сопротивление ρ нахо-

Частота коэффициента затухания	Удельное сопротивление среды, Ом·м		
	0.25 (морская вода)	1—10 (донные осадки, насыщенные морской водой)	255 Расчетное значение по результатам измерений в море Шумановских резонансов (донные осадки, насыщенные газом)
7 Гц, 1/м	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$(5.3—1.7) \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$
14 Гц, 1/м	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$(7.4—2.3) \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-4}$
21 Гц, 1/м	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$(9.1—2.9) \cdot 10^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$

дится из формулы для расчета коэффициента затухания электромагнитных волн в хорошо проводящей среде: $\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\rho}}$, в которой $\omega = 2\pi f = 6.28 \cdot 21 = 131.88$ 1/с — круговая частота; $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная проницаемость донных осадков).

Авторы благодарны О.Ф. Верещагиной за выполнение газохроматографических анализов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-05-00153А; 18-35-0047 мол_а; 18-1-008 (по программе «Дальний Восток»); гостемы «Газогеохимические поля морей Востока Азии, геодинамические процессы и потоки природных газов, влияющие на формирование геологических структур с залежами углеводородов и аутигенной минерализации в донных осадках», 0271-2016-0008.

ЛИТЕРАТУРА

Брэйди Д., Кэмпбелл Т., Фенвик А., Ганц М., Сандберг С.К., Буонора М.П., Родригес Л.Ф., Кэмпбелл Ч., Комбе Л., Ферстер А., Умбах К.Е., Лабруццо Т., Церилли А., Николс Э.А., Пэтмор С., Стиллинг Я. Электромагнитное зондирование для поиска углеводородов // Нефтегазовое обозрение, 2009, т. 21, № 1, с. 4—23.

Буров Б.А., Дрога А.Н. Шумановские резонансы в электрическом поле на больших глубинах в море // ДАН, 1988, т. 305, № 3, с. 571—573.

Варнавский В.Г., Седых А.К., Рыбалко В.И. Палеоген и неоген Приамурья и Приморья. Владивосток, ДВО АН СССР, 1988, 184 с.

Геологическая карта Приморского края м-ба 1 : 1 000 000 / Под ред. В.А. Бажанова, Ю.Н. Олейника. МинГео, ПГГО, 1986.

Геология СССР. Т. XXXII. М., Недра, 1969, 696 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1 : 200 000. Издание второе. Ханкайская серия. Лист К-52-ХII (Владивосток), К-52-ХVIII (Зарубино). МПР РФ Приморская поисково-съёмочная экспедиция, 2002а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Ханкайская серия. Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения. Лист К-52-ХII (Владивосток), К-52-ХVIII (Зарубино). МПР РФ Приморская поисково-съёмочная экспедиция, 2002б.

Гресов А.И. Геохимическая классификация углеводородных газов угольных бассейнов Востока России // Тихоокеанская геология, № 2, 2011, с. 85—101.

Гресов А.И., Обжиров А.И. Метан месторождений Южно-Приморского углегазоносного района как нетрадиционный источник углеводородного сырья // Геология угольных месторождений. Межвуз. научн. темат. сборник, вып. 16. Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2006, с. 199—202.

Гресов А.И., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы ее промышленного освоения. Т. I. Углеметановые бассейны Приморья, Сахалина и Хабаровского края. Владивосток, Дальнаука, 2009, 247 с.

Гресов А.И., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П., Яцук А.В. Изотопно-геохимические показатели углеводородных газов донных осадков шельфа Восточно-Сибирского моря // ДАН, 2016, т. 469, № 6, с. 711—713.

Григорьева Н.И., Ивин В.В. Подводные исследования Большого Гамовского каньона (района залива Петра Великого, Японское море) // Тихоокеанская геология, 2015, т. 34, №1, с. 103—108.

Карнаух В.Н., Карп Б.Я., Цой И.Б. Сейсмостратиграфия осадочного чехла и условия осадконакопления на шельфе и материковом склоне в районе залива Петра Великого (Японское море) // Океанология, 2007, т. 47, № 2, с. 1—12.

Мишукова Г.И., Обжиров А.И., Мишуков В.Ф. Метан в пресных и морских водах и его потоки на границе вода—атмосфера в Дальневосточном регионе. Владивосток, Дальнаука, 2007, 159 с.

Мишукова Г.И., Гресов А.И., Мишуков В.Ф. Природные аномалии метана на акватории залива Петра Великого Японского моря // Материалы IV Международного экологического форума. Владивосток, Изд-во «РЕЯ», 2009, с. 211—213.

Мишукова Г.И., Мишуков В.Ф., Окулов А.К. Распределение метана и его потоков на границе вода—атмосфера на акватории залива Петра Великого (Японское море) // Вестник ДВО РАН, 2013, № 6, с. 120—127.

Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Обжиров А.И. Характерные особенности проявлений газово-флюидных эманацій на северо-восточном склоне о. Сахалин (Охотское море) // Тихоокеанская геология, 2009, т. 28, № 3, с. 38—52.

Объяснительная записка к Государственной геологической карте РФ м-ба 1 : 200 000. Издание второе. Лист К-52-ХVIII (Зарубино) / Ред. Н.К. Цесарский. ППСЭ МПР РФ. М., 2000, 207 с.

Угольная база России. Т. V, кн. 1. М., Изд-во Геоинформмарк, 1997, 371 с.

Хахенберг Х., Шмидт А. Газохроматографический анализ равновесной паровой фазы. М., Мир, 1979, 160 с.

Sweeney S.A., Jennings Jr. H.Y. Effect of wettability on the electrical resistivity of carbonate rock from a petroleum reservoir // J. Phys. Chem., 1960, v. 64, p. 551—553.

Toledo-Redondo S., Salinas A., Portí J., Morente J.A., Fornieles J., Galindo-Zaldívar A.J., Pedrera A., Ruiz-Constán A., Anahnah F. Study of Schumann resonances based on magnetotelluric records from the western Mediterranean and Antarctica // J. Geophys. Res., 2010, v. 115, D22114.

Wei J.Z., Lile O.B. Influence of wettability on two- and four-electrode resistivity measurements on Berea sandstone plugs // SPE Formation Evaluation, 1991, p. 470—476.

Zhou D., Arbabi S., Stenby E.H. Effect of wettability on the electrical properties of reservoir rocks, 1996, SCA conference paper number 9624.

Рекомендована к печати 1 марта 2018 г.

М.И. Эповым

Поступила в редакцию 14 ноября 2016 г.,

после доработки — 18 августа 2017 г.