

В.Н. КАРНАУХ, Е.Н. СУХОВЕЕВ, В.П. МАТЮХОВ,
К.А. АПАРИНА

Характер распределения приповерхностных скоплений газа в осадках юго-западной части залива Петра Великого (Японское море)

Представлены результаты высокоразрешающих сейсмоакустических исследований в юго-западной части зал. Петра Великого. В осадках шельфа залива обнаружены акустические аномалии, связанные с присутствием газа. Выполнена классификация типов акустических аномалий газовой природы в верхней части осадочного чехла и составлена карта их площадного распространения. Сделано предположение, что источником газа могут служить угленосные осадочные отложения фундамента – углистые алевролиты с линзами каменных углей пермского возраста и продукты разложения органических остатков в осадках погребенных лагун.

Ключевые слова: сейсмоакустические исследования, приповерхностные скопления газа, Японское море, залив Петра Великого.

Distribution of shallow gas accumulations in the sediments of the south-western part of the Peter the Great Bay (Japan Sea). V.N. KARNAUKH, E.N. SUKHOVEEV, V.P. MATYUKHOV, K.A. APARINA (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

High-resolution seismic investigations were carried out to study the south-west part of the Peter the Great Bay. Acoustic anomalies associated with gas presence were revealed in the sediments of the shelf of the Bay. Classification of the types of acoustic anomalies of gas origin in the upper part of sedimentary cover was carried out. Their lateral extension has been mapped. Analyses of the geological structure of the bay depression suggest that the Permian sediments with coal layers and peaty sediments in the base of Holocene strata are the possible gas source origin.

Key words: seismic investigations, shallow gas accumulations, Sea of Japan, Peter the Great Bay.

Введение

Залив Петра Великого располагается в северо-западной части Японского моря и характеризуется наличием обширного мелководного шельфа с глубинами моря 20–100 м. Юго-западная часть залива, между устьем р. Туманная и островами Римского-Корсакова,

*КАРНАУХ Виктор Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, СУХОВЕЕВ Евгений Николаевич – научный сотрудник, МАТЮХОВ Виктор Павлович – инженер, АПАРИНА Кристина Анатольевна – аспирант (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: karnaukh@poi.dvo.ru

Работа выполнена по теме госзадания АААА-А17-117030110033-0 «Палеоокеанология окраинных морей Востока России и примыкающих районов Тихого океана, особенности и этапность кайнозойского осадконакопления, магматизма и рудогенеза» и в рамках гранта АААА-А18-118022090002-7 по программе «Дальний Восток» ДВО РАН 18-1-008 «Строение и развитие земной коры дна дальневосточных морей России и Восточного сектора Арктики, прогноз и оценка энергетических и минеральных ресурсов их шельфовых областей».

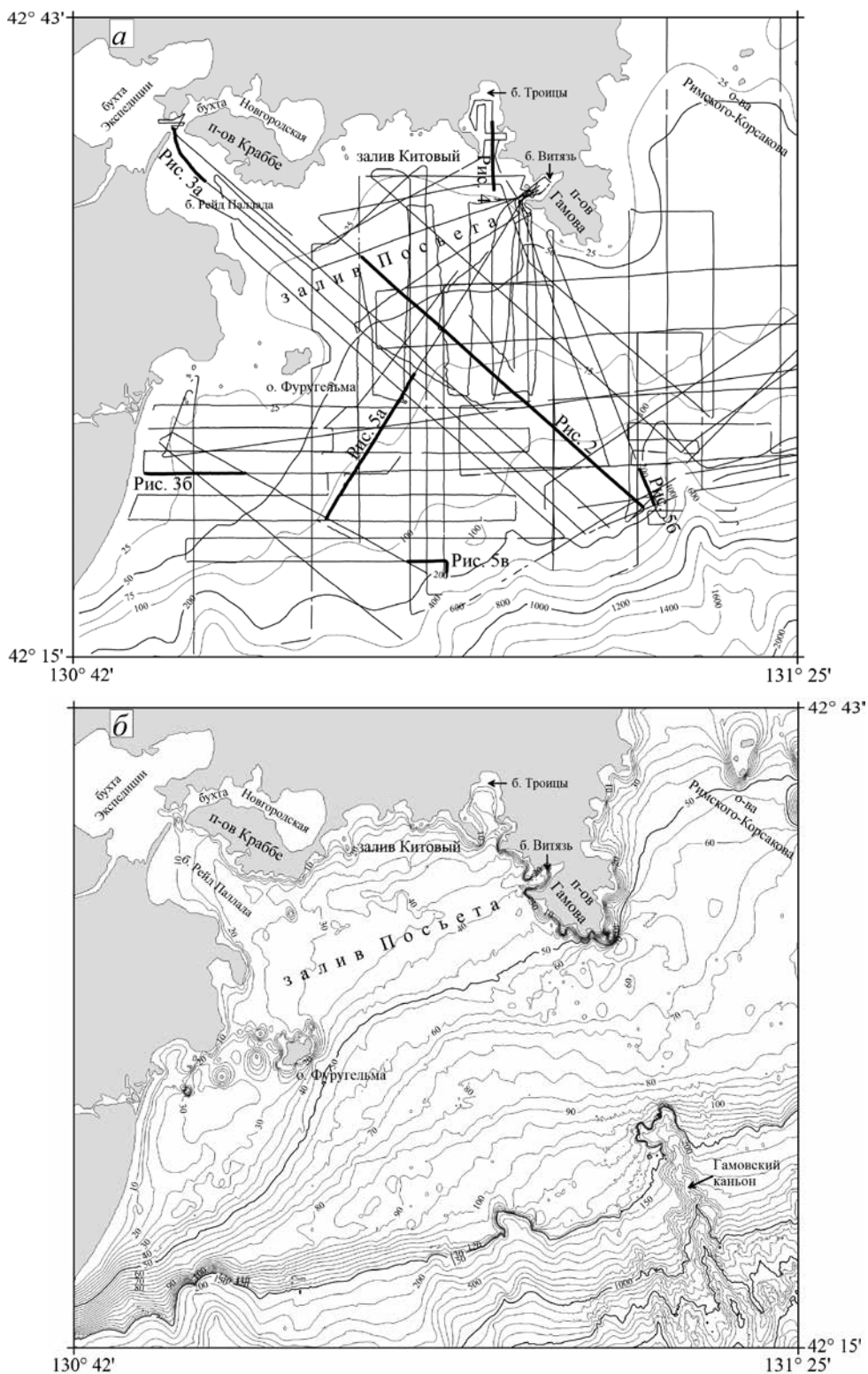


Рис. 1. *а* – расположение профилей высокорезающих сейсмоакустических исследований в юго-западной части зал. Петра Великого и местоположение профилей, показанных на рис. 2–5. Батиметрия из [4]; *б* – рельеф дна юго-западной части зал. Петра Великого. На шельфе залива в интервале глубин 10–130 м изобаты проведены через 5 м

включает заливы Посьета и Китовый, бухты Рейд Паллада, Троицы, Витязь и прилегающий к ним внешний шельф. Фундамент этой части залива сложен осадочными породами (песчаниками, алевролитами, углистыми алевролитами с линзами каменных углей) пермского возраста, гранитоидами поздней перми и ранней юры, а также вулканическими образованиями поздне триасового и эоценового возрастов [1]. Шельф покрыт осадочным чехлом раннемиоцен-четвертичного возраста мощностью до 1000 м [6]. На дне моря распространены преимущественно голоценовые мелко- и среднезернистые пески [7].

Изучение четвертичных отложений юго-западной части зал. Петра Великого имеет длительную историю. Здесь начиная с 1960-х годов был выполнен большой объем геологических работ (отбор проб грунта дночерпателем и прямоточными трубками) и отработано несколько профилей методом непрерывного сейсмоакустического профилирования с электроискровым источником [7] и высокочастотным профилографом [8]. На основе этих работ были восстановлены условия современной и позднеплейстоценовой седиментации. На записях высокочастотного профилографа обнаружены единичные акустические аномалии, связанные, видимо, с присутствием газа в донных отложениях [8]. Данные аномалии аналогичны изученным в Амурском заливе [3, 16]. Однако сейсмические исследования в этом районе были выполнены в небольшом объеме, и характер распределения газовых включений на значительной части акватории остался неизученным. Для восполнения этого пробела в 2009–2017 гг. Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН осуществил в зал. Петра Великого несколько морских экспедиций, в которых выполнялись сейсмоакустические и батиметрические исследования с высоким разрешением (рис. 1а).

Исходные данные и результаты работ

Работы проводились методом непрерывных профильных наблюдений с применением высокочастотного профилографа «GeoPulse Subbottom Profiler». Использовался сигнал частотой 3,5 кГц. Скорость судна при работах составляла 4–7 узлов. Попутно осуществлялся промер глубин с помощью судовых эхолотов. Полученные данные вместе с материалами предшествующих исследований [4–6, 8] были использованы для составления карты рельефа дна юго-западной части зал. Петра Великого (рис. 1б).

Установлено, что дно моря представляет собой наклоненную на юго-восток слабохолмистую поверхность. На шельфе выделяются четыре ступени, образованные в результате колебаний уровня моря в позднем плейстоцене и голоцене. В их пределах распознаются главные элементы затопленных береговых линий – береговые валы, лагуны и абразионные уступы (рис. 2). Первая ступень располагается на глубине около 107 м, вторая – в интервале глубин 65–78 м, третья – на глубине около 56 м, четвертая – на глубинах 37–43 м. Средняя ширина лагун 1,5–3,0 км. Ширина береговых валов 1–2 км. Бровка шельфа располагается в интервале глубин 125–135 м.

Акустический облик осадков верхней части чехла в пределах погребенных элементов береговой линии сильно различается. Как правило, на шельфе глубже 55 м, в лагунах, на абразионных уступах и береговых валах в осадочных отложениях выделяются два слоя. Верхний слой представлен отложениями, акустический облик которых изменяется от прозрачного до умеренно стратифицированного, содержащего низкоамплитудные отражающие горизонты. Максимальные значения мощности слоя (5 м) отмечаются в депрессиях лагун (при вычислении принята скорость звука в осадках 1600 м/с). На склонах береговых валов и абразионных уступов толщина слоя уменьшается до 2–3 м. Нижний слой имеет сложное строение и характеризуется резкопеременным акустическим обликом. В его верхней части преобладают акустически прозрачные отложения. Нижняя часть слоя представлена образованиями с различной степенью стратифицированности (от слабой до умеренной), содержащими высокоамплитудные отражающие горизонты. Максимальные значения мощности нижнего слоя (17 м) отмечаются на склонах абразионных уступов.

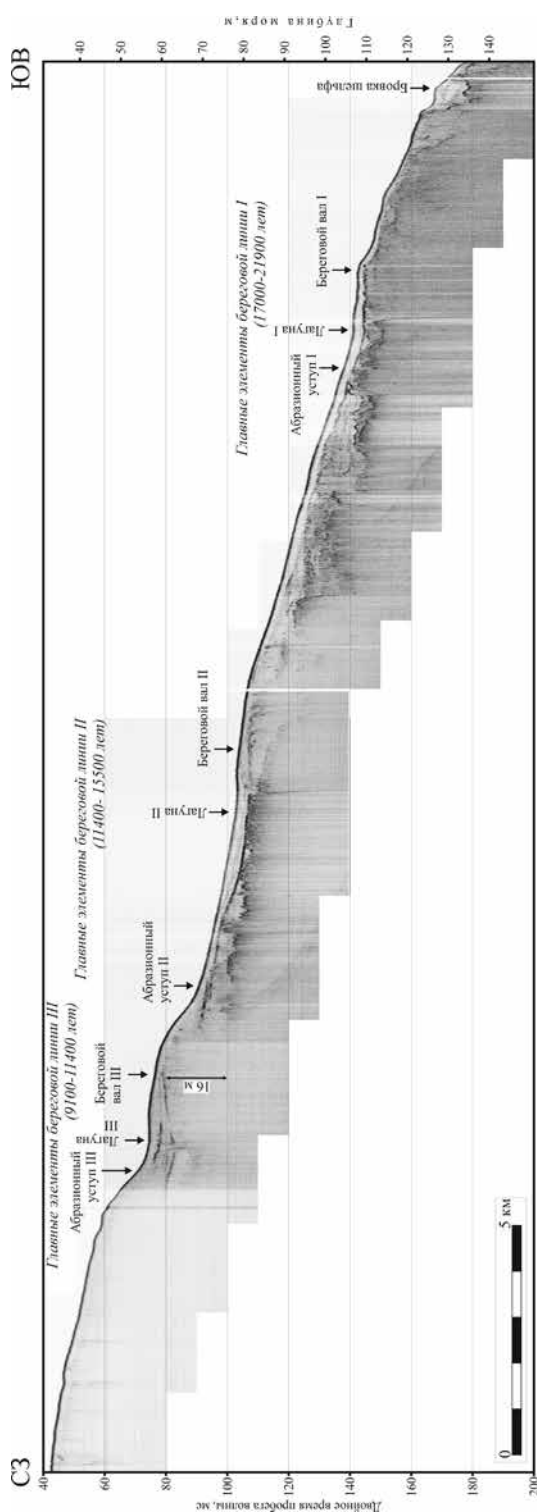


Рис. 2. Пример высокоразрешающего сейсмоакустического профиля, иллюстрирующий общее строение шельфа юго-западной части зал. Петра Великого. Для определения возраста главных элементов затопленных береговых линий использованы сведения из работы [9]. Положение профиля показано на рис. 1а

В лагунах толщина нижнего слоя уменьшается до 3–5 м. На береговых валах, как правило, наблюдаются акустически прозрачные или хаотические образования. В прозрачной части разреза иногда прослеживаются одиночные отражающие горизонты переменной интенсивности длиной в первые сотни метров.

В частях шельфа на глубинах менее 55 м склоны абразионных уступов представлены отложениями с прозрачным акустическим обликом. Отдельные локальные депрессии шириной до 1 км и глубиной до 15 м заполнены акустически стратифицированными образованиями.

Согласно результатам выполненных литологических работ [2, 8], верхний слой в лагунах и на склонах абразионных уступов, а также береговые валы сложены средне- и мелкозернистыми песками, иногда с присутствием илистой фракции.

Примечательной особенностью строения юго-западной части зал. Петра Великого является наличие в осадочном чехле акустических аномалий различного вида: «покров», «колонна», «мутность», «столбы» и «завеса», подобных обнаруженным ранее в Амурском заливе [3, 16].

Акустический «покров» выражается в виде интервала неупорядоченных непрерывных отражений, которые полностью скрывают и делают неразборчивой расположенную ниже часть сейсмической записи (рис. 3–5). Верхняя кромка аномалии, как правило, ровная и субгоризонтальная, иногда наклонная (повторяет наклон слоев осадочного чехла), характеризуется наличием высокоинтенсивных отражений. Борты аномалии обычно имеют кругую субвертикальную кромку. Размер аномалий

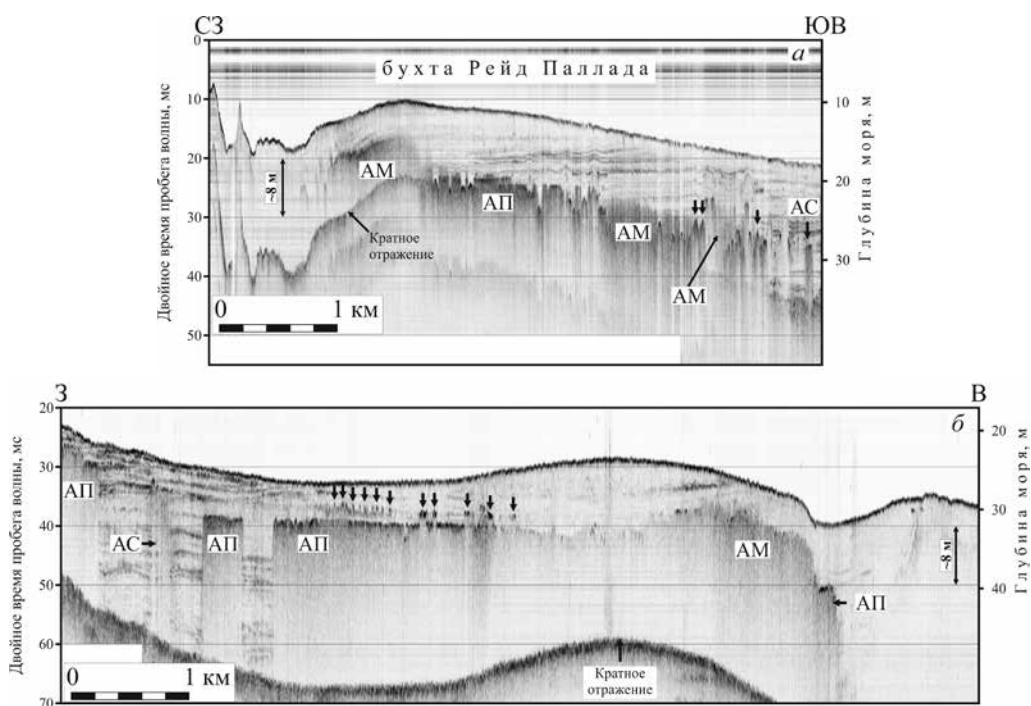


Рис. 3. Примеры сейсмоакустических профилей, иллюстрирующие облик акустических аномалий типа «покров» (АП), «мутность» (АМ), «столб» (АС) и «колонна» (обозначены вертикальными стрелками, направленными вниз) в пляжной (а) и мелководной (б) частях шельфа. Положение профилей показано на рис. 1а

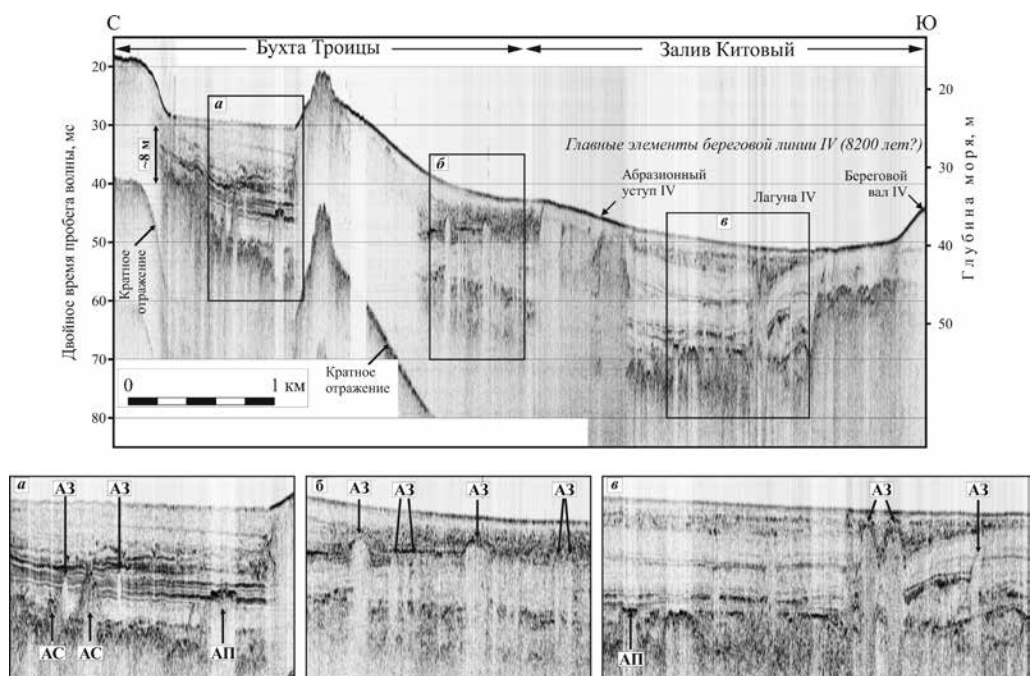


Рис. 4. Пример сейсмоакустического профиля, иллюстрирующий облик акустических аномалий типа «завеса» (А3), покров (АП) и «столб» (АС) в мелководной части шельфа. Положение профиля показано на рис. 1а

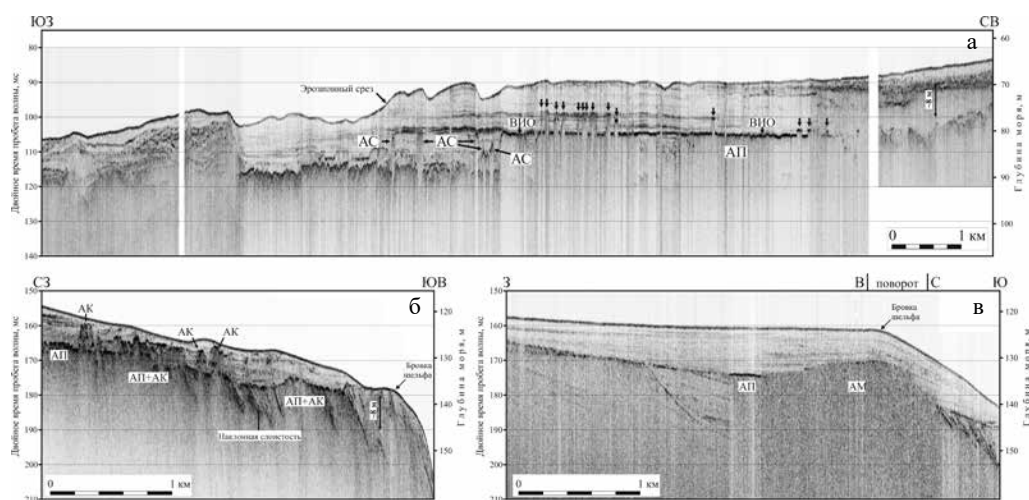


Рис. 5. Примеры сейсмоакустических профилей, иллюстрирующие облик акустических аномалий типа «покров» (АП), «мутность» (АМ), «столб» (АС) и «колонна» (АК и вертикальные стрелки, направленные вниз) в средней (а) и внешней частях шельфа вблизи его бровки (б, в). ВЮ – горизонт высокоинтенсивных отражений. Положение профилей показано на рис. 1а.

в поперечнике достигает 1500 м. Глубина залегания их верхних кромок изменяется в диапазоне от 5 до 12 м от дна. Аномалии данного типа чаще всего встречаются в основании или средней части осадочного разреза.

Акустические «колонны» выглядят как узкие, шириной в первые десятки метров, прозрачные и полупрозрачные вертикальные зоны, нарушающие структуру записи. Высота «колонн» достигает 5 м. Их верхняя кромка, как правило, представлена высокоинтенсивным отражением. Часто «колонны» группируются вместе по 5–10 аномалий. В группах кровли отдельных аномалий могут находиться как на одном, так и на разных горизонтах. Данный тип аномалий распространен в верхней части осадочного разреза на глубине 1–8 м от поверхности морского дна.

Акустическая «мутность» характеризуется присутствием интервала беспорядочных, хаотичных отражений различной степени интенсивности (рис. 3, 5). Характерной чертой аномалии данного типа является неровная верхняя кромка с нечеткими контурами. Акустическая «мутность» фиксируется на глубинах 5–10 м ниже дна, в поперечнике она составляет 1500 м. Частный случай аномалий данного типа – акустические «столбы», которые имеют конусообразную форму и прослеживаются непосредственно из структур акустического фундамента. Диаметр основания «столбов» около 50–200 м, высота достигает 20 м, их внешние контуры, как правило, нечеткие. Часто «столбы» располагаются по периметру «покровов». Они могут быть одиночными, на расстоянии 50–400 м друг от друга, но встречаются и группы по 2–5 аномалий. Глубина, на которой фиксируются вершины «столбов», составляет 4–10 м ниже дна.

В осадках бухты Троицы и зал. Китовый обнаружены многочисленные аномалии типа «завеса» (рис. 4). Они выделяются на глубине 2–8 м ниже дна. Ширина данных аномалий составляет 50–100 м, высота 6–14 м. Их кровля имеет грибовидную форму и часто характеризуется высокоинтенсивными отражениями. Внутренняя область «завесы» акустически прозрачна. Аномалии данного типа полностью маскируют нижележащую структуру осадочных отложений.

Обсуждение результатов

На шельфе юго-западной части зал. Петра Великого четко выделяются четыре группы главных элементов затопленных береговых линий, образованные в результате колебаний уровня моря в позднем плейстоцене–голоцене в зоне волно-прибойной активности и представленные цепочками лагун, ограничивающих их береговых валов и абразионных уступов (рис. 2, 4). Время формирования трех ранних береговых линий показано на рис. 2. Возраст четвертой линии можно определить на основании сопоставления с аналогичными структурами в Амурском заливе, где элементы береговой линии, располагающиеся в сходном интервале глубин, были сформированы примерно 8200 лет назад [16]. Таким образом, четвертую затопленную береговую линию, прослеживаемую на глубинах 37–43 м, можно датировать этим же возрастом (рис. 4).

В осадках юго-западной части зал. Петра Великого нами обнаружены специфические акустические аномалии различного вида. Из литературных источников [10, 13–15] известно, что такие аномалии широко распространены в осадках шельфа Мирового океана. Наиболее часто они встречаются на участках шельфа с глубинами менее 50 м, а их образование связано с присутствием в поверхностных осадках газа (главным образом метана). Установлено, что при использовании сейсмических сигналов в диапазоне от нескольких сотен герц до нескольких десятков килогерц проникновение акустической энергии в осадки сильно зависит от присутствия в среде свободного газа. Слои и области осадочного чехла, заполненные пузырьками газа, ведут себя как высокоэффективные рассеиватели акустической энергии, препятствующие распознаванию структуры осадочного покрова ниже газонасыщенных горизонтов. На сейсмических записях они отражаются в виде специфических рисунков (типа акустической «мутности»). Другой характерный сейсмоакустический признак наличия газонасыщенных осадков – присутствие горизонта высокоинтенсивных отражений, появление которого объясняется увеличением способности отражения от кровли заполненного газом осадочного слоя. О присутствии в осадках газа свидетельствуют также акустические аномалии типа «покров» и «колонна». Появление аномалий типа «покров» может быть связано с разрушением первичной слоистости осадочного чехла, что вызывает поглощение и рассеяние акустической энергии на кровле слоя газосодержащих осадков.

Нами проведено картирование выделенных аномалий, и на рис. 6 представлена карта их площадного распространения. На акватории юго-западной части зал. Петра Великого установлено 26 отдельных участков локальных приповерхностных скоплений газа, которые могут быть сгруппированы в пять больших областей.

Первая область располагается в северо-западной части бухты Рейд Паллада в пределах участков дна с глубинами 10–22 м. Размер области примерно 6 × 2 км. Здесь обнаружен полный набор акустических аномалий: «мутность», «покров», «колонны», «столбы» и «завеса». Минимальные значения глубины залегания кровли акустических аномалий составляют около 5 м ниже дна. Наиболее широко распространены аномалии типа АМ, встречающиеся, как правило, на границе между ступенями фундамента. Скорее всего, они маркируют разломные зоны, являющиеся проводниками газа к поверхности морского дна. Размеры отдельных аномалий АМ – от первых десятков метров до 1500 м в поперечнике.

Вторая, самая обширная, область прослеживается на расстоянии около 3 км к юго-западу от о-ва Фуругельма и занимает участки дна с глубинами от 10 м до немногим более 30 м. Размер области примерно 14 × 9 км. Почти половина площади области находится в пределах Дальневосточного государственного морского заповедника. Здесь преобладают аномалии типа «покров» и «мутность» (рис. 3б). Кровли АП фиксируются на глубинах 3, 6 и 8 м ниже дна, наблюдается тенденция увеличения глубины кровли аномалий с ростом глубины моря. Там, где глубина моря увеличивается до 25 м и более, преобладают аномалии типа АМ, кровля которых находится на глубине около 6 м ниже дна. Аномалии типа «колонна» и «столбы» здесь редки, и их кровли располагаются наиболее близко к поверхности – на глубине около 3 м.

Третья область занимает площадь внешней части зал. Китовый (между бухтами Троицы и Витязь), преимущественно в пределах осевой части затопленной палеолагуны, и акваторию центральной и южной частей бухты Троицы. Здесь выделяется цепочка признаков наличия газа общей протяженностью около 15 км и шириной до 2 км. В данной области преобладают аномалии типа «завеса», аномалии типа «покров» имеют подчиненное значение (рис. 4). Как отмечено выше, приповерхностные скопления газа в виде аномалий АЗ располагаются на небольшой глубине – всего около 2 м ниже дна. Западнее п-ова Гамова на расстоянии около 0,5 км от берега обнаружен участок размером примерно $1,5 \times 1,5$ км с приповерхностными скоплениями газа, выраженными в виде аномалий типа «завеса», «столбы», «колонны» и «мутность».

Четвертая область находится в 3–4 км к юго-востоку от о-ва Фуругельма, в пределах участков дна с глубинами от 57 до 85 м. Размер области примерно 13×7 км. Здесь преобладают аномалии типа «покров», прорываемые аномалиями типа «колонна», выступающими над АП на высоту 2–5 м (рис. 5а). Кровля АП маркируется горизонтом высокоинтенсивных отражений на глубине около 12 м ниже дна. Размер АП в поперечнике достигает 4–5 км. Аномалии типа «столбы» имеют подчиненное значение, их вершины находятся на глубине около 9 м от дна.

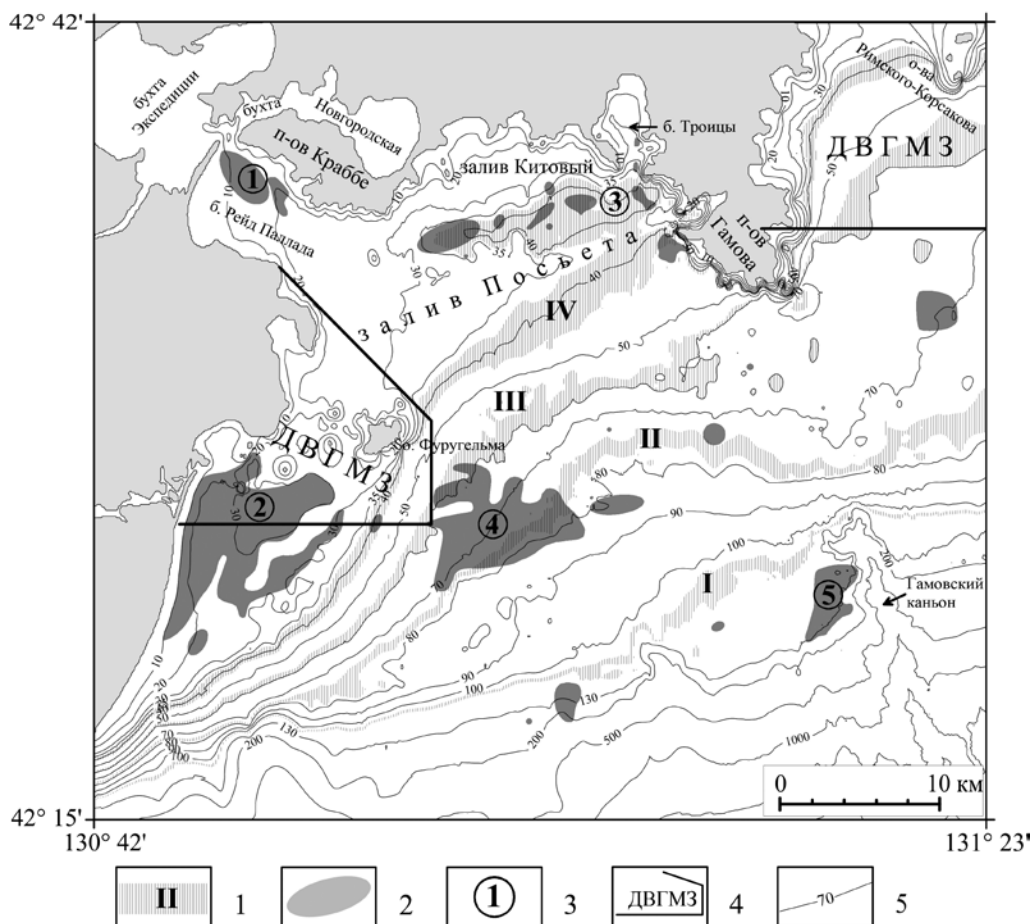


Рис. 6. Карта расположения акустических аномалий, связанных с присутствием газа в позднплейстоцен-голоценовых осадках в юго-западной части зал. Петра Великого. 1 – местоположение осевых частей (лагуна) главных элементов затопленных позднплейстоцен-голоценовых береговых линий и их номера; 2 – расположение акустических аномалий в осадочном чехле, связанных с наличием приповерхностных скоплений газа; 3 – номера областей приповерхностных скоплений газа; 4 – границы Дальневосточного государственного морского заповедника (ДВГМЗ); 5 – изобаты, м

Пятая область выделена на западном борту Гамовского каньона, в месте его вреза в шельф в интервале глубин моря 120–135 м (рис. 5б). В этом районе приповерхностные скопления газа сгруппированы в область размером 5×2 км, протягивающуюся вдоль бровки шельфа. Здесь преимущественно распространены аномалии типа АП, кровля которых лежит на глубине 7–8 м ниже дна. Многочисленные акустические «колонны» прорывают АП и почти достигают морского дна, располагаясь на глубине около 1 м от дна.

Кроме пяти описанных выше больших областей с приповерхностными скоплениями газа в осадочных отложениях на площади залива существует еще несколько изолированных небольших участков размером до нескольких квадратных километров, где обнаружены акустические аномалии газовой природы (рис. 5в, 6). Предположительно, они могут маркировать места новых зарождающихся или же уже разрушенных старых скоплений газа.

Верхние кромки аномалий, выделенных в юго-западной части зал. Петра Великого, можно разделить на два типа. Первый тип представлен высокоинтенсивным отражающим горизонтом, относительно прямолинейным и часто параллельным первичной слоистости осадочного чехла. Это наблюдается у аномалий типа «покров» и свидетельствует о том, что имеет место значительный объем поступления газа – более 5 % [12], накопление которого контролируется стратиграфией чехла. Аналогичную верхнюю кромку имеют аномалии типа «колонна». Это также говорит о высокой концентрации скоплений газа в ограниченном пространстве в кровле аномалии. Верхняя кромка второго типа характеризуется нечеткими, размытыми контурами. Это свойственно аномалиям типа «мутность». Внутри аномалий частично сохранены черты исходной слоистости. Можно предположить, что рассеяние акустической энергии на содержащихся в осадке газовых пузырьках значительно меньше, чем в районах развития акустического «покрова», что объясняется существенно меньшим (<1 %) содержанием газа [11].

Ранее были представлены доказательства наличия обширных приповерхностных скоплений газа в осадочных отложениях северной части зал. Петра Великого [3, 10]. Обнаружение подобных газовых включений в позднплейстоцен-голоценовых осадках юго-западной части залива предполагает существование здесь второй по значимости провинции газонасыщенных шельфовых осадков. Источником газа могут служить угленосные осадочные отложения фундамента – углистые алевролиты с линзами каменных углей пермского возраста [1]. Образование газа возможно и в результате разложения органических остатков в осадках погребенных лагун.

Заключение

В непосредственной близости от областей и участков газовых скоплений располагается акватория, отнесенная к Дальневосточному государственному морскому заповеднику. Миграция газа из очагов промежуточных скоплений вверх через осадочные отложения в водную толщу может вызывать обезжизнение осадка, изменение физико-химических свойств донного грунта и развитие особой фауны, живущей за счет окисления метана [16]. Нельзя исключать пульсирующего характера поступления газа из недр залива. Это, в свою очередь, может приводить к периодическому вымиранию биоценозов, живущих за счет окисления метана, и замещению их другими, и наоборот. В итоге это может трансформировать состояние всей морской флоры и фауны заповедника.

Авторы выражают признательность экипажам НИС «Профессор Гагаринский» и «Малахит» за помощь в проведении работ, а также благодарят администрацию Дальневосточного государственного морского заповедника за выдачу разрешений на проведение работ на акватории заповедника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохин В.М., Рыбалко В.И., Аленичева А.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист К-(52), 53. Владивосток; СПб.: Карт. фабр. ВСЕГЕИ, 2011. 332 с.
2. Деркачев А.Н., Уткин И.В., Боцул А.И. Отчет о научно-исследовательских работах, проведенных в 32-м рейсе НИС «Первенец» (залив Петра Великого, Японское море, июнь–июль 1979 г.). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1980. 122 с.
3. Карнаух В.Н., Суховеев Е.Н., Листровая И.А. Высокоразрешающие сейсмоакустические исследования скоплений газа в голоценовых донных отложениях Амурского залива (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 3. С. 56–64.
4. Карнаух В.Н., Суховеев Е.Н., Коптев А.А., Зверев С.А., Белоус О.В., Лопатников Е.А., Теличко А.С., Калинин В.В., Ищенко М.А. Комплексные океанологические исследования материкового склона и подводной возвышенности Первенца Японского моря в 67-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Гагаринский» // Океанология. 2018. Т. 58, № 1. С. 162–165.
5. Карнаух В.Н. Рельеф дна северо-западной части Японского моря // Геоморфология. 2010. № 1. С. 42–51.
6. 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. 282–293.
7. Марков Ю.Д. Южноприморский шельф Японского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 128 с.
8. Самченко А.Н., Карнаух В.Н., Аксентов К.И. Геолого-геофизические исследования верхней части осадочного чехла и геоакустическая модель шельфа залива Посыета (Японское море) // Тихоокеан. геология. 2013. № 1. С. 65–74.
9. Шельфовая область Японского моря. Геология и минералогия / под ред. В.И. Ушакова. СПб.: ВНИИ «Океангеология», 2005. 137 с.
10. Fleisher P., Orsi T.H., Richardson M.D., Anderson A.L. Distribution of free gas in marine sediments: a global overview // *Geo-Mar. Lett.* 2001. Vol. 21, N 2. P. 103–122.
11. Garcia-Gil S., Vilas F., Garcia-Garcia A. Shallow gas features in incised-valley fills (Ria de Vigo, NW Spain): a case study // *Contin. Shelf Res.* 2002. Vol. 22, N 16. P. 2303–2315.
12. Gregory A.R. Fluid saturation effects on dynamic classic properties of sedimentary rocks // *Geophysics.* 1976. Vol. 41. P. 895–913.
13. Judd A.G., Hovland M. Seabed fluid flow: the impact on geology, biology and the marine environment. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2007. 492 p.
14. Judd A.G., Hovland M. The evidence of shallow gas in marine sediments // *Contin. Shelf Res.* 1992. Vol. 12, N 10. P. 1081–1095.
15. Judd A.G. The global importance and context of methane escape from the seabed // *Geo-Mar. Lett.* 2003. Vol. 23. P. 147–154.
16. Karnaukh V.N., Astakhov A.S., Vereshchagina O.F. et al. Formation of subsurface shallow gas accumulations in Amurskiy Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) as a result of postglacial sea-level change, paleoceanographic conditions and hydrological activity // *Mar. Geol.* 2016. Vol. 372. P. 31–52.