УДК 551.462(261.243)

В. А. ЖАМОЙДА, Д. В. РЯБЧУК, М. А. СПИРИДОНОВ, А. Г. ГРИГОРЬЕВ (ВСЕГЕИ),
Н. В. ПИМЕНОВ (ИНМИ),
А. В. АМАНТОВ, Ю. П. КРОПАЧЕВ, И. А. НЕЕВИН (ВСЕГЕИ)

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОК-МАКОВ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

В 2009–2012 гг. в ходе работ по мониторингу состояния геологической среды дна восточной части Финского залива ВСЕГЕИ получены новые материалы о распространении пок-маков и геолого-геоморфологических условиях их формирования. Установлено широкое распространение пок-маков, имеющих, несмотря на морфологическое сходство, различный генезис. Появление пок-маков в областях аккумуляции алевропелитовых илов в центральной части исследованной площади обусловлено выходами современных биогенных газов, в Копорском заливе – предположительно разгрузкой подземных вод Вендского водоносного комплекса, хотя не исключена их связь с тектоническими нарушениями. Наличие разновозрастных генераций пок-маков указывает на пульсационный характер их возникновения.

Ключевые слова: *пок-мак, газонасыщенные осадки, Финский залив.*

In 2009–2012 new data concerning distribution of pock-marks in the eastern Gulf of Finland as well as geological and geomorphologic conditions of their formation were gathered within the monitoring of geological environments. Pock-marks of the different genesis are widespread in the gulf bottom. The pock-marks discovered within the areas of silty-clayey sedimentation in the central part of the gulf were formed as a result of biogenic gas-seepage. In the Kopora Bay pock-marks were probably formed as a result of groundwater discharge from the Vendian aquifer system, although it is possible to find some spatial correlation with tectonic faults distribution. The presence of pock-marks of several generations indicates pulsating nature of their occurrence.

Keywords: *pock-mark, gas-bearing sediments, Gulf of Finland.*

Введение. Кратероподобные структуры, или пок-маки, формируются на поверхности дна, сложенного тонкозернистыми осадками морских и озерных бассейнов в результате субаквальных выходов флюидов, а именно, подземных вод или углеводородных газов [18, 22, 23]. В плане эти объекты имеют форму, стремящуюся к окружности или овалу, если она не деформировалась за счет оползания грунтов или воздействия придонных течений [21, 23, 29]. Диаметр таких структур может изменяться от первых до 1500 м при глубине котловины от долей метра до 150 м [21, 26].

Источники газов могут быть различными. В современных морских алевропелитовых осадках метан образуется при переработке органического вещества. Иногда в составе флюидов присутствует двуокись углерода, вероятно, образующаяся за счет биологического метаболизма и при анаэробном окислении метана [18]. Газонасыщенные пористые современные морские отложения широко развиты на дне морей, на что указывает затухание акустического сигнала в приповерхностном геологическом разрезе [15, 24, 30, 35].

В гляциальных шельфах, где отложения обеднены органическим веществом, появление пок-маков часто связывают с выходами глубинных термальных газов, мигрирующих к поверхности дна по тектоническим разломам [12, 13, 17, 28, 31]. Предполагаются как вертикальная диффузия газов, так и их латеральная миграция в области повышенной проницаемости.

Согласно различным гипотезам [18, 21, 22], выбросы газа происходят либо при относительно постоянном или периодичном подтоке, либо эпизодически в результате воздействия катастрофических явлений, таких как землетрясение или аномальный шторм, приводящих к резкому перемещению осадков в виде оползней. К примеру, исследования, проведенные на шельфе Северной Калифорнии и в зал. Патрас (Греция), показали, что спусковым механизмом для выбросов газа послужили именно землетрясения [16, 20].

Существуют также теории образования морфологически сходных с пок-маками кратерообразных форм без участия газовых выбросов за счет воздействия льда или подтока грунтовых вод [19, 21, 25].

По литературным данным, в Балтийском море метановые кратеры выявлены в районах распространения газонасыщенных осадков и повышенных содержаний метана в придонной воде в пределах Гданьской, Арконской и Готландской впадин [2, 27, 33]. В Гданьской впадине общая площадь зоны пок-маков составляет около 27 км^2 [11]. Их размеры от 200–900 м по длинной оси до 150–200 м в ширину, глубина до 1–3 м. В польском секторе Гданьской впадины установлен единичный пок-мак длиной 3 км и шириной 400 м. В ряде случаев с помощью сейсмоакустического профилирования удалось выявить «действующие» пок-маки в зонах подводных газовых эманаций [11]. В зал. Экенфорд (Балтийское море, Германия) причиной возникновения пок-маков, вероятно,

© В. А. Жамойда, Д. В. Рябчук, М. А. Спиридонов, А. Г. Григорьев, Н. В. Пименов, А. В. Амантов, Ю. П. Кропачев, И. А. Неевин, 2013

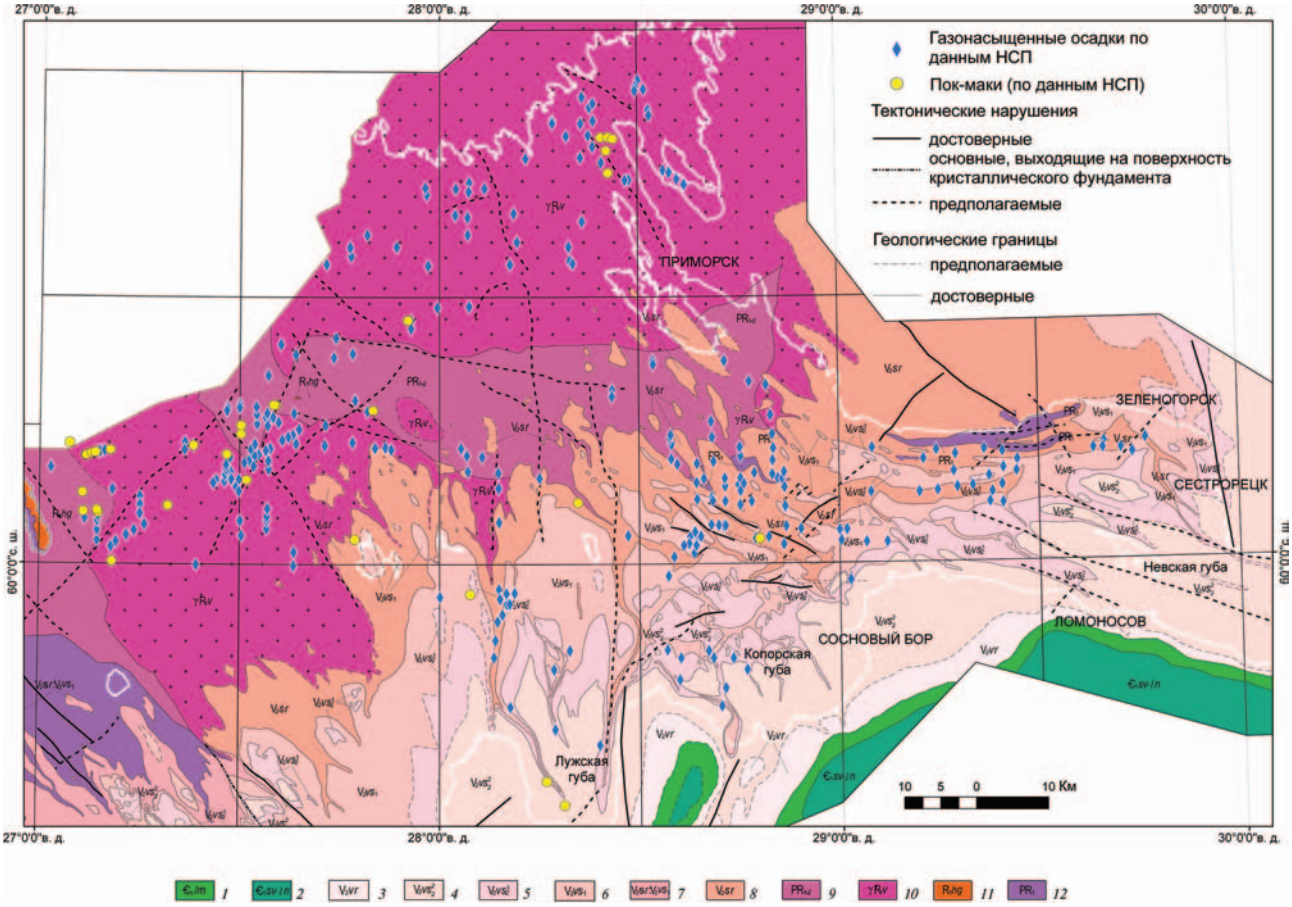

Рис. 1. Распределение газонасыщенных осадков и пок-маков на геологической карте дочетвертичных образований северо-восточной части Финского залива

1 – ломоносовская свита. Песчаники, алевролиты с прослоями глин; *2* – сиверская и лонтоваская свиты. Глины с прослоями алевролитов и песчаников; *3* – воронковская свита. Песчаники, алевролиты с прослоями глин; *4* – василеостровская свита, верхняя подсвита, верхняя пачка (котлинские слои). Глины с прослойками алевритов и сидеритовых конкреций; *5* – василеостровская свита, верхняя подсвита, нижняя пачка. Переслаивание глин и алевролитов; *6* – василеостровская свита, нижняя подсвита (гдовские слои). Алевролиты, миктиты, глины, песчаники; *7* – старорусская свита или нижняя подсвита василеостровской свиты. Пески, песчаники, миктиты; *8* – старорусская свита. Глины, аргиллиты, миктиты, в нижней части пески и песчаники; *9* – нерасчлененные досреднерифейские магматические и супракрустальные образования; *10* – выборгский комплекс гранитов рапакиви, габброанортозитов; *11* – хогландский комплекс. Конгломераты, кварциты, порфириты, кварцевые порфиры; *12* – нерасчлененные метаформации. Гнейсы, гранат-биотитовые и мигматиты по ним, амфиболиты, кварциты

являются выходы напорных подземных вод, а не газовые выбросы [34]. В пределах Стокгольмского архипелага на дне, среди ледниково-озерных ленточных и морских голоценовых отложений обнаружены также многочисленные пок-маки диаметром от 1 до 35–40 м при глубине просадки до 3 м. По данным комплексных геолого-геофизических исследований [32], большая часть этих пок-маков образована на поверхности ледниково-озерных глин за счет просачивания глубинных термальных газов по разломам в кристаллических породах. В то же время некоторые из пок-маков Стокгольмского архипелага связаны с выходами современных биогенных газов, а часть сформировалась на участках подводного просачивания грунтовых вод [32].

Кратероподобные структуры диаметром до 150 м, которые, вероятнее всего, являются пок-маками, описаны в западной части Финского залива в экономической зоне Финляндии (устн. сообщ. А. Котилайнена и Г. Валлиуса). В российской части Финского залива в 1989–2000 гг. при проведении ВСЕГЕИ геологосъемочных работ методом непрерывного сейсмоакустического профилирования в рельефе и геологическом разрезе четвертичных отложений выявлено около 25 воронкообразных структур (рис. 1). Их горизонтальный размер не превышает 10–20, а глубина 1–2 м. Они приурочены к зонам устойчивого накопления голоценовых илов с высоким (более 5%) содержанием органического вещества. Наибольшая концентрация пок-маков отмечается на западе российской зоны залива, между островами Гогланд и Мощный. Толща литориновых и постлиториновых отложений в центральных частях седиментационных бассейнов достигает мощности 10 м и более, что создает условия для накопления в осадке биогенных газов. Подобные газонасыщенные осадки опробованы грунтовыми трубками при проведении геологической съемки шельфа (ГСШ). Начиная с первых метров разреза, они характеризуются высокой степенью пористости, из-за чего керны немедленно растрескивались и разрушались после их извлечения из пробоотборников. Иногда отмечался и сильный запах сероводорода. Однако анализ профилей непрерывного сейсмоакустического профилирования указывает на возможную

приуроченность скоплений газов в илах и к тектоническим разломам (рис. 1). В частности, это может объясняться тем, что в условиях интенсивной ледниковой и водно-ледниковой препарировки зон нарушений, секущих супракрустальные образования фундамента, избирательная денудация сопряженных линейных кор выветривания привела к образованию множественных переуглубленных понижений, впоследствии служивших седиментационными ловушками.

В 2009 г. при проведении экспедиционных работ ВНИИОкеангеологии на НИС «Ладога» пок-маки были обнаружены в северо-восточной части Копорского залива. Форма воронок в плане округлая, овальная, размеры от первых метров до первых десятков метров, относительная глубина от первых десятков сантиметров до первых метров [5]. В 2010 г. В. В. Ивановой были организованы детальные геолого-геохимические исследования двух пок-маков Копорского залива: отобраны пробы придонной и поверхностной воды, донных отложений, бентосных гидробиологических сообществ, измерены температуры и pH придонной воды, в пробах воды и донных осадков определены концентрации макро- и микроэлементов, а также органических соединений [5]. Было установлено, что придонные воды в районе исследованных пок-маков имели повышенную (+6,9 °С) по сравнению с фоновой (+3,2 °С) температуру, характеризовались высокие содержания биогенов, марганца и главных катионов и анионов (K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-} и Br^-) при пониженном содержании железа. Донные отложения также отличались повышенными содержаниями практически всех микрокомпонентов и существенно железистым по сравнению с фоновым составом для алевропелитов района [5]. Авторами было высказано предположение о фильтрации в районе пок-маков воды с солевым составом, отличающимся от морского, однако указывалось, что вопрос о происхождении самих пок-маков «остался невыясненным и требует дальнейших исследований». Кроме того, В. В. Иванова и соавторы [5] ошибочно предполагали, что исследованные ими пок-маки Копорского залива располагаются в «районе с экзодинамической обстановкой преимущественного накопления осадков». По данным ГСШ-200 ВСЕГЕИ [1], морские голоценовые алевропелитовые илы здесь практически отсутствуют, и сейчас преобладают условия ненакопления или подводного размыва.

В 2009–2012 гг. в ходе проведения работ по мониторингу состояния геологической среды дна Финского залива ВСЕГЕИ получены новые материалы о распространении пок-маков и геолого-геоморфологических условиях их формирования.

В восточной части Финского залива известно значительное количество пок-маков. Их генезис и возраст, равно как и оценка интенсивности процессов, формирующих их, остаются дискуссионными. Решение этих проблем имеет значение для комплексной характеристики возможного воздействия газофлюидов, выходящих на поверхность дна, на состояние морской природной среды, для прогнозной оценки региона с точки зрения современной активности тектонических разрывных нарушений, для изучения происходящих диагенетических геохимических процессов в донных отложениях, а также для оценки рисков потенциальных геологических опасностей.

Методика исследований. В 2009 и 2011 гг. в восточной части Финского залива в ходе совместных рейсов ВСЕГЕИ, Геологической службы Финляндии и Института окружающей среды Финляндии (SYKE) с борта НИС «Аранда» было выполнено непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) высокого разрешения. Использовался акустический комплекс с пьезокерамическим излучателем (рабочая частота 12 кГц). Запись акустических данных производилась в цифровом виде на приборно-аппаратурный комплекс Meridata MD DSS sonar system.

В 2012 г. в Копорском заливе ВСЕГЕИ с борта НИС «Ладога» выполнено НСП (25 км) с использованием приборно-аппаратурного комплекса GEONT–HRP (ООО «Спектр-Геофизика»). Применялся высокочастотный источник – бумер с рабочими частотами 0,2–5 кГц. Тогда же было выполнено 30 км профилирования методом гидролокации бокового обзора (ГЛБО) с использованием комплекса CM2 (C-MAX Ltd.). В результате обработки профилей ГЛБО создана акустическая картина поверхности дна с привязкой в ГИС, что позволило проанализировать расположение пок-маков по отношению к формам донного рельефа и зонам развития различных типов донных отложений. Геофизическое профилирование сопровождалось промером глубин с использованием цифровых эхолотов «HydroBox™» (SYQWEST) и Furuno GP7000F с инструментальной погрешностью не выше 0,5% глубины.

По результатам анализа материалов геофизического профилирования были выбраны две станции, на которых выполнен пробоотбор поверхностных осадков с помощью ковша-дночерпателя грейферного типа и герметичной грунтовой трубки (ГГТ) конструкции Лаури–Ниемисто. Верхняя часть геологического разреза была вскрыта ударной прямоточной трубкой (длина керна до 2,5 м). На каждой станции отбирались две длинные колонки, одна обрабатывалась на борту судна, другая транспортировалась в лабораторию ВСЕГЕИ для дальнего анализа. Пробы придонной воды были отобраны с использованием ГГТ, концентрации макро- и микроэлементов определялись на масс-спектрометре ELAN 6100 DRC с индуктивно-связанной плазмой (ICP–MS) в Центральной химической лаборатории ВСЕГЕИ.

Содержание метана в донных осадках измерено методом фазоворавновесной дегазации в Институте микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН [14]. Пробы воды помещали в пенициллиновые флаконы объемом 30 мл с фиксатором (KOH) для подавления микробных процессов. Затем дозатором выдавливали одинаковый объем воды и немедленно плотно закрывали пробкой из газонепроницаемой бутиловой резины. Пробы из осадков отбирали двухмиллиметровым пластиковым шприцем с обрезанным концом и помещали в пенициллиновый флакон, наполняли доверху дегазированной водой и, выдавив стандартный объем воды, закрывали пробкой из бутиловой резины. Содержание метана в газовой фазе определяли на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором «Кристалл 2000».

Обсуждение результатов. Полученные данные показали, что большая часть пок-маков, выявленных по НСП, сопряжено со слоями верхнеголоценовых морских алевропелитовых газонасыщенных

илов. Образование в осадках значительных количеств восстановленных газов – метана и сероводорода определяется активностью современных процессов трансформации органического вещества микробным сообществом [9]. По результатам определения в 2012 г. содержаний углеводородных газов в современных приповерхностных донных газонасыщенных осадках концентрация метана может достигать 23 549,60 Cppm. В районах распространения газонасыщенных осадков отмечается и заметное увеличение концентраций метана в придонных водах [9]. На сейсмограммах довольно четко прослеживается связь «подводящих каналов» рассматриваемого типа пок-маков со скоплениями газа в нижних слоях толщ голоценовых илов (рис. 2). На сейсмограммах такие скопления газов прослеживаются по рассыпанию акустического сигнала и потере корреляции.

В ряде случаев удается проследить во времени развитие пок-маков, установленных в голоценовых алевропелитовых илах. При геологической съемке в 1991 г. в районе о. Гогланд (субмеридиональный геолокационный профиль 52) зафиксировано скопление газа в толще донных осадков. Верхние 3–4 м морских голоценовых илов представляли собой ненарушенную слоистую толщу (рис. 3). В 2011 г. то же место было обследовано вновь. Вкрест предыдущему разрезу был пройден субширотный профиль 047–048, выявивший «прорыв» газа на поверхности дна, из-за чего толща вмещающих осадков «просела» на глубину около 4 м и сформировалась кольцеобразная структура диаметром около 5 м (рис. 4).

Достаточно очевидно, что образование пок-маков данного типа в восточной части Финского залива связано с подводными выходами газов. Природа этих газов весьма спорна, так как специализированных исследований в российской части Финского залива не проводилось. Можно предложить две основные гипотезы источников газовых эманаций: переработка органического вещества, накопившегося в голоценовых илах за последние 10 тыс. лет, или субаквальная разгрузка газов по тектоническим нарушениям (глубинным разломам). Ответ могут дать дальнейшие специализированные исследования, включающие как геофизические (гидролокация бокового обзора, НСП, многолучевое эхолотирование), так и гидрохимические и геохимические методы (специализированный пробоотбор, определение содержания метана и гомологов в придонных водах и донных отложениях, изотопные методы).

Отметим как дополнительный известный мощный газогенерирующий источник возможные останцы морских микулинских отложений с очень высоким содержанием битуминозного органического вещества. Предполагается, что они имели сплошное распространение в пределах Финского залива, Ладожского озера и Приневской низменности, но были уничтожены денудацией в ходе последнего оледенения, сохранившись в виде останцов [8]. Хотя они не вскрыты пробоотбором в пределах Финского залива, данные НСП свидетельствуют в пользу их возможного редкого сохранения в некоторых погребенных врезах, западинах и участках более контрастного доледникового рельефа в зонах теоретического ослабления ледниковой и флювиогляциальной деструкции [10].

Второй тип подводных структур, морфологически сходных с пок-маками, установлен в восточной части Финского залива в областях отсутствия мощных толщ голоценовых илов.

В районе Выборгского залива при выполнении поисково-разведочных работ на железомарганцевые конкреции ОАО «Петротранс» на поверхности дна обнаружены округлые и овальные формы донного рельефа диаметром до 10–18 м. В 2007–2009 гг. они закартированы ВСЕГЕИ методом ГЛБО (рис. 5). Данные пок-маки хорошо прослеживаются на сонограммах по довольно контрастной смене интенсивности отражения акустического сигнала. В рельефе дна они выражены очень слабо, что позволяет предположить, что такая контрастность связана с концентрической изменчивостью, например, физико-механических свойств осадков. Впрочем, и это утверждение пока бездоказательно. В 2011 г. здесь же была проведена съемка многолучевым эхолотом, которая показала, что, кроме выявленных ранее четырех пок-маков, других подобных образований в районе нет. Повторные съемки методом ГЛБО показали, что эти формы весьма стабильны во времени.

Рис. 2. Пок-маки (район о. Гогланд) на записи непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП). Совместный рейс ВСЕГЕИ и Геологической службы Финляндии на НИС «Аранда» (2009)

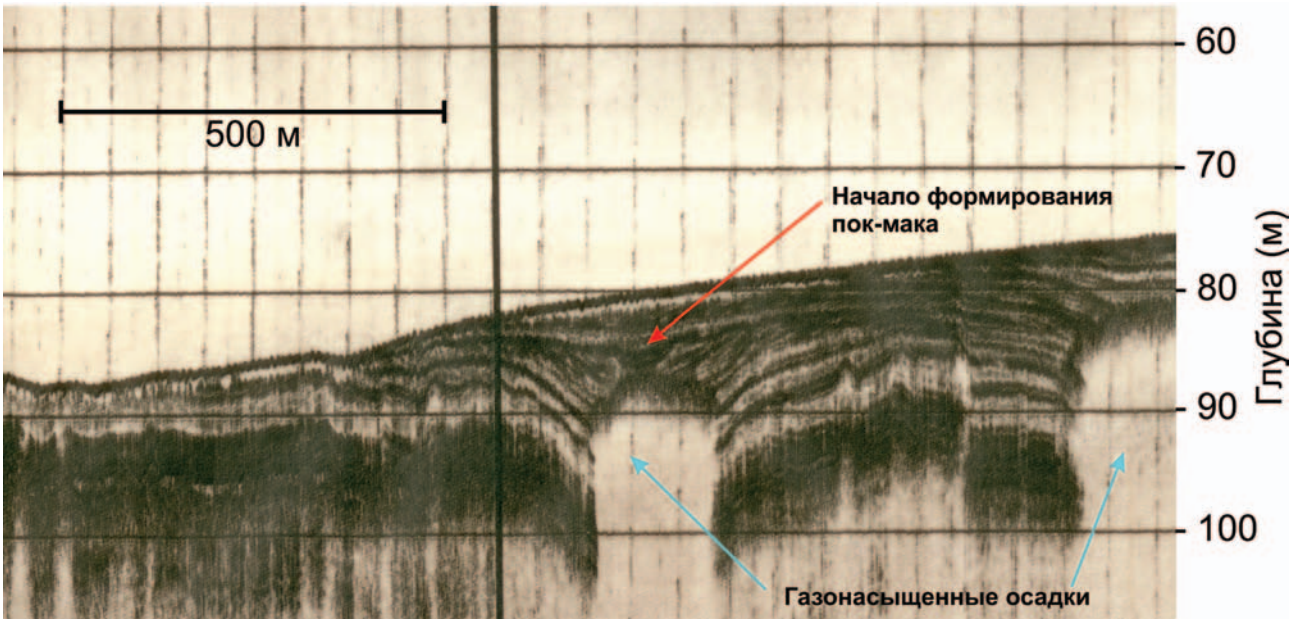

Рис. 3. Газонасыщенные осадки и начальная стадия образования пок-мака на профиле НСП (данные ВСЕГЕИ, 1991 г.)

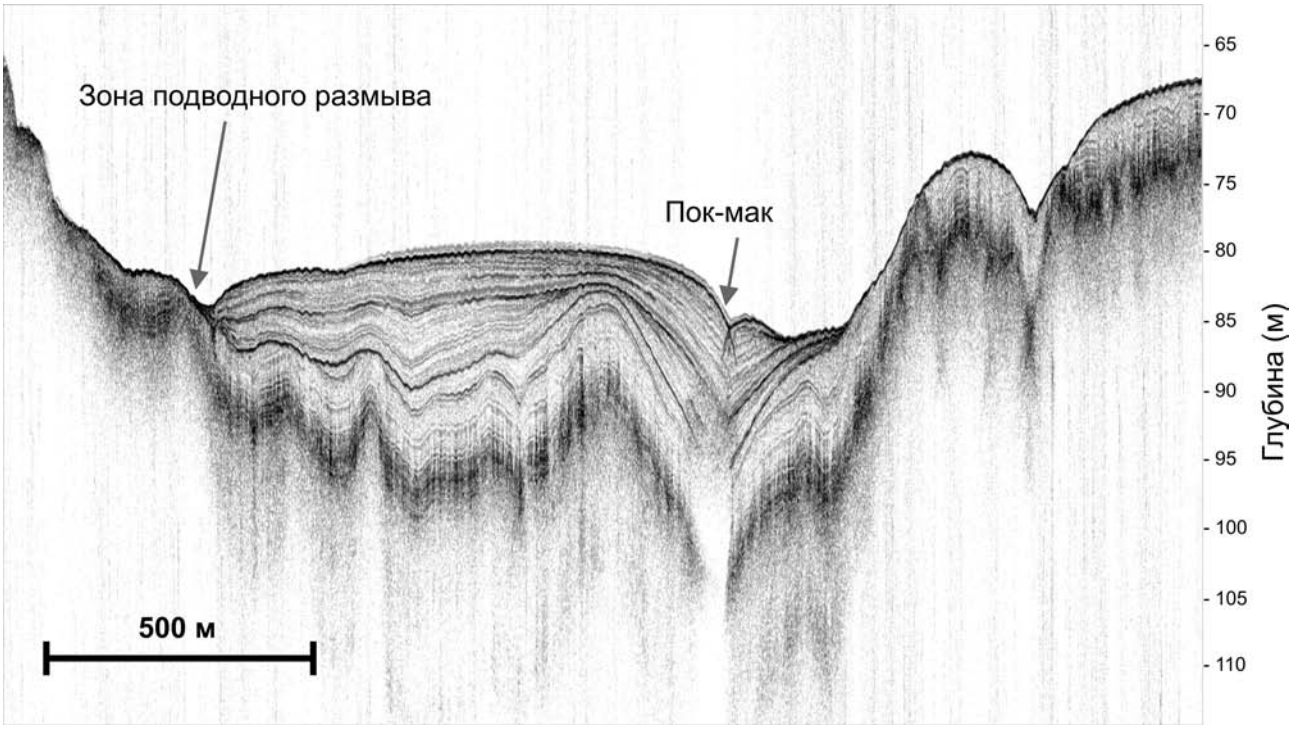

Рис. 4. Пок-мак на профиле НСП, пройденном вкрест профилю НСП на рис. 3. Совместный рейс ВСЕГЕИ и Геологической службы Финляндии на НИС «Аранда» (2011)

В отличие от пок-маков первого типа данные образования располагаются по периферии зон современной алевропелитовой аккумуляции, где мощность морских голоценовых илов незначительна (до 15–20 см). Они подстилаются глинистыми осадками Анцилового озера и Балтийского ледникового озера с низким содержанием органического вещества и метана, а микробная активность в них невелика [9]. Маловероятно, чтобы пок-маки, установленные в Выборгском заливе, могли быть связаны с современным газопроявлением. Не получило подтверждения и предположение о возможности формирования этих структур за счет разгрузки грунтовых вод, так как в поровых водах поверхностных осадков, отобранных в пределах этих пок-маков, не обнаружено признаков распреснения, типичных для зон высачивания пресных грунтовых вод [9].

Наибольшая плотность пок-маков установлена в восточной части Копорского залива [6]. Как показало профилирование ГЛБО (ВСЕГЕИ, 2012 г.), на небольшой площади (около 7 км^2) выявлено более 70 пок-маков. В ряде случаев удалось установить зоны «скопления» пок-маков различных генераций (рис. 6).

Учитывая высокую активность проявления пок-маков в Копорском заливе, несколько под-

Рис. 5. Сонограмма поверхности морского дна с одним из пок-маков, обнаруженных в районе Выборгского залива (данные ВСЕГЕИ, 2011 г.)

робнее остановимся на геологическом строении этой площади. Дочетвертичные образования дна залива представлены породами чехла, перекрывающего пенепленизированную кровлю протерозойского фундамента, которая полого погружается в юг-юго-восточном направлении. Осадочный чехол, выклинивающийся в северном направлении за счет вторичного денудационного срезания, повсеместно представлен отложениями валдайской серии верхнего венда, залегающими полого, моноклинально со слабым падением к югу. В региональной шкале этой серии соответствуют редкинский и котлинский горизонты. Местные стратоны редкинского горизонта – старорусская свита, котлинского горизонта – василеостровская и воронковская свиты (рис. 1, 7).

Старорусская свита редкинского горизонта (V_2sr) представлена миктитами, песчаниками, аргиллитами и аргиллитоподобными глинами, алевролитами общей мощностью не более 45 м, залегающими на корах выветривания фундамента. Более молодая василеостровская свита котлинского горизонта делится на нижнюю (песчаную) и верхнюю (глинистую) подсвиты. Нижняя часть василеостровской свиты (нижняя подсвита – $V_2vs_2^1$) обособляется в качестве гдовских слоев с преобладанием субаркозовых песчаников и алевролитов сероватого и красно-бурого цветов. В разрезе обычно присутствуют миктиты, реже гравелиты, в верхней части встречаются прослои аргиллитоподобных глин. Гдовские слои залегают на отложениях старорусской свиты. Мощность гдовских слоев 30–50 м. Верхняя подсвита представлена толщей серовато-голубых гидрослюдистых глин с подчиненными алевритовыми прослоями. Василеостровские глины практически повсеместно перекрыты четвертичными осадками [1].

Собственно поле пок-маков располагается в пределах широтной зоны малоамплитудных разломов и разрывов (рис. 7), отчетливо проявленной в вендском чехле. На стыке этой зоны и субширотно-северо-западной готской зоны, контролирующей контур самой губы и глубокой погребенной туннельной долины (хотя и опосредованно через денудацию, практически без вертикальных смещений), может существовать область повышенной трещиноватости.

От осевой части залива в юго-восточном направлении в непосредственной близости к полю распространения пок-маков тянется вышеупомянутая палеодолина, в бортах которой последовательно обнажаются породы верхней подсвиты василеостровской свиты, нижней подсвиты (гдовские слои) котлинского горизонта и (на дне палеоврeза) старорусской свиты котлинского горизонта венда. С более песчаными слоями связан мощный вендский водоносный комплекс, приобретающий мощный глинистый водоупор вблизи зоны развития пок-маков. На склонах палеодолины, врезанной до отметок –75, –80 (а в нескольких километрах северо-западнее до –110 м) может происходить

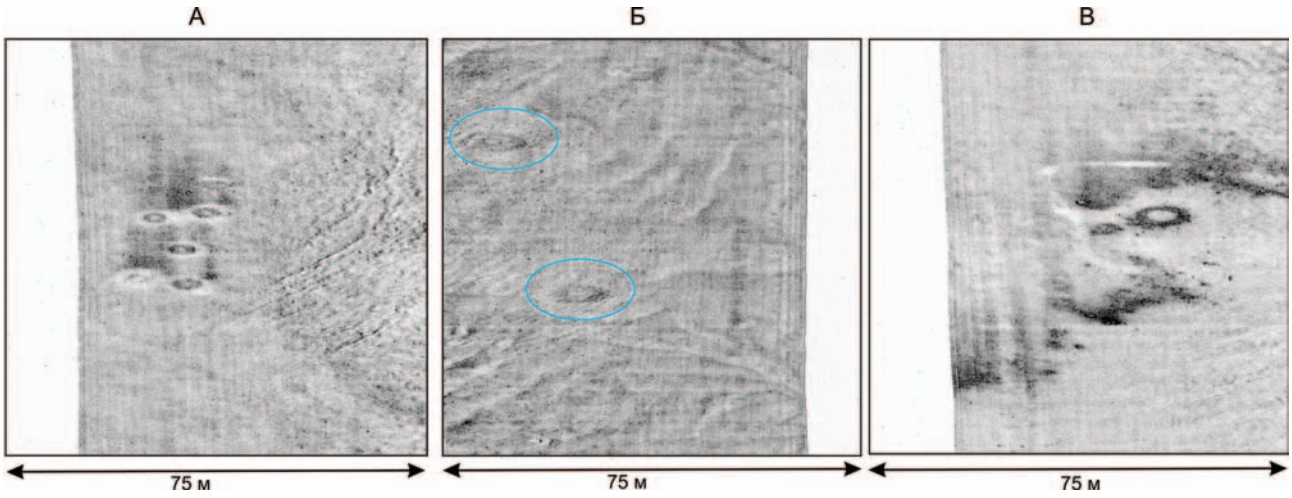

Рис. 6. Фрагменты сонограммы ГЛБО (2012 г.) в Копорском заливе

А – серии мелких «активных» пок-маков (диаметр 5 м), *Б* – серии крупных «реликтовых» пок-маков (диаметр 15 м), *В* – крупный «активный» пок-мак (диаметр 13–14 м)

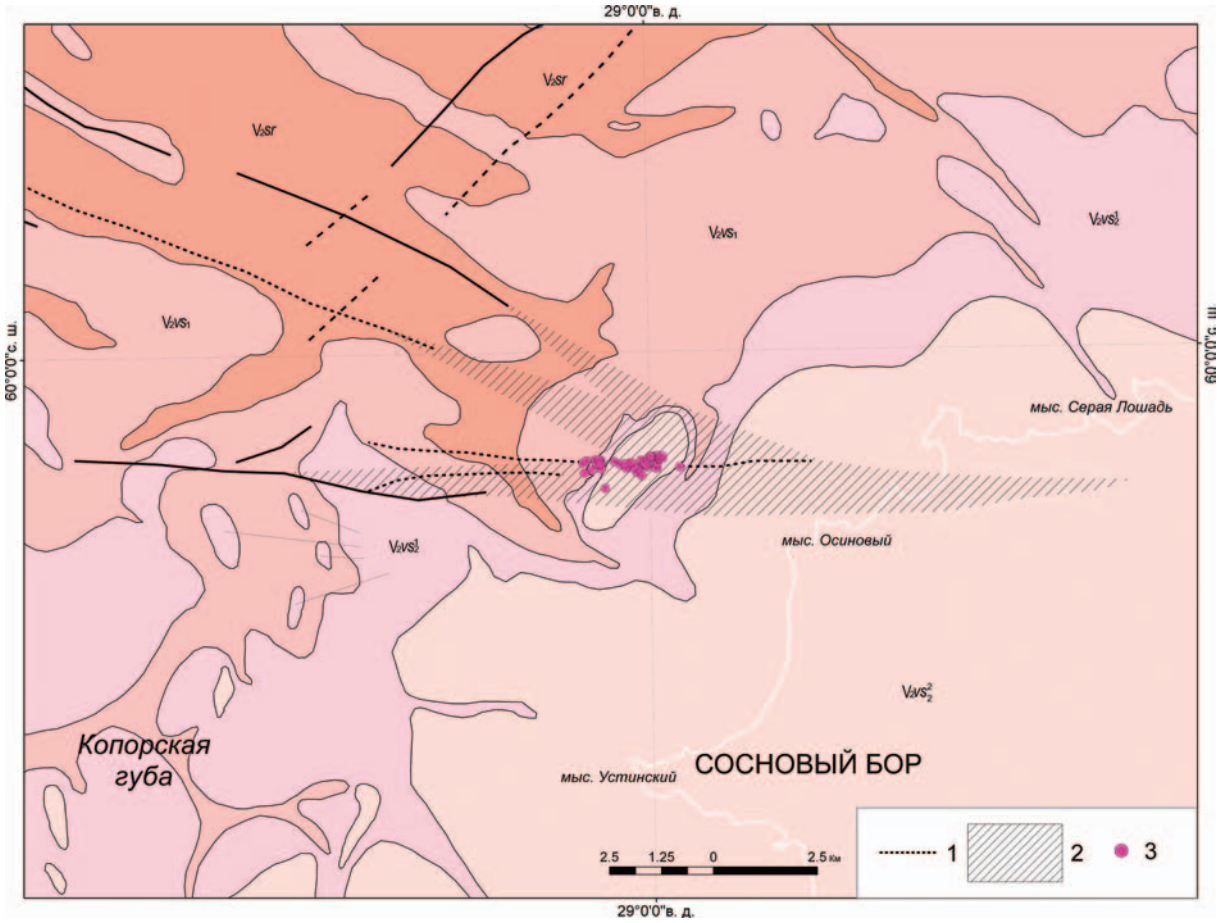

Рис. 7. Фрагмент карты дочетвертичных образований с полем пок-маков, установленным по данным ГЛБО

1 – мелкоамплитудные разломы; *2* – зона повышенной трещиноватости и проницаемости дочетвертичных пород, *3* – пок-маки. Основные усл. обозн. см. на рис. 1

подводная разгрузка подземных вод. Воды комплекса трещинно-пластовые, напорные, хлоридные натриевые, и степень минерализации последовательно увеличивается от 3 до 35 г/л и более. Воды вендского комплекса характеризуются высокими концентрациями хлора и брома [3, 4, 7]. Заметим также, что мощный северо-западный врез не единичен, в районе пок-маков западнее также выявлены элементы «горбатых» переуглубленных туннельных долин по крайней мере двух генераций. Известно, что в пределах таких долин могут быть развиты гидравлически сопряженные с вендским комплексом гидрокарбонатные межморенные водоносные горизонты с существенно повышенным содержанием железа, реже марганца.

Четвертичные отложения на рассматриваемом участке дна Копорского залива представлены мореной лужской стадии валдайского оледенения, а также неоверхнеплейстоценовыми ленточными глинами и глинами Балтийского ледникового озера. Мощность голоценовых осадков непосредственно в районе развития поля пок-маков не превышает первых десятков сантиметров (рис. 8, 9). Ледниковые отложения выходят на поверхность дна

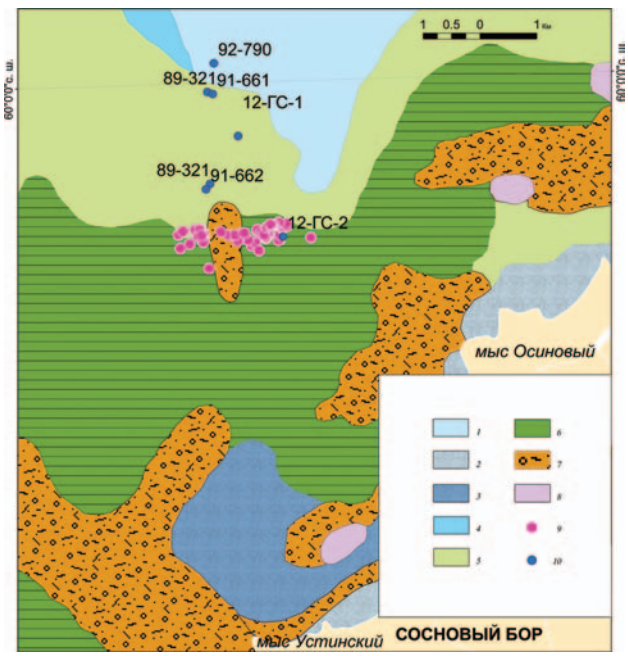

Рис. 8. Фрагмент карты четвертичных отложений Копорского залива с полем пок-маков, установленным по данным ГЛБО

1 – литориновые и лимниевые илы; *2* – лимниевые морские отложения, пески; *3* – литориновые морские отложения, пески; *4* – анциловые озерные отложения, глины; *5* – отложения Балтийского ледникового озера, глины; *6* – ледниково-озерные отложения, ленточные глины; *7* – морена, валунные суглинки; *8* – дочетвертичные образования; *9* – пок-маки по данным ГЛБО; *10* – станции пробоотбора

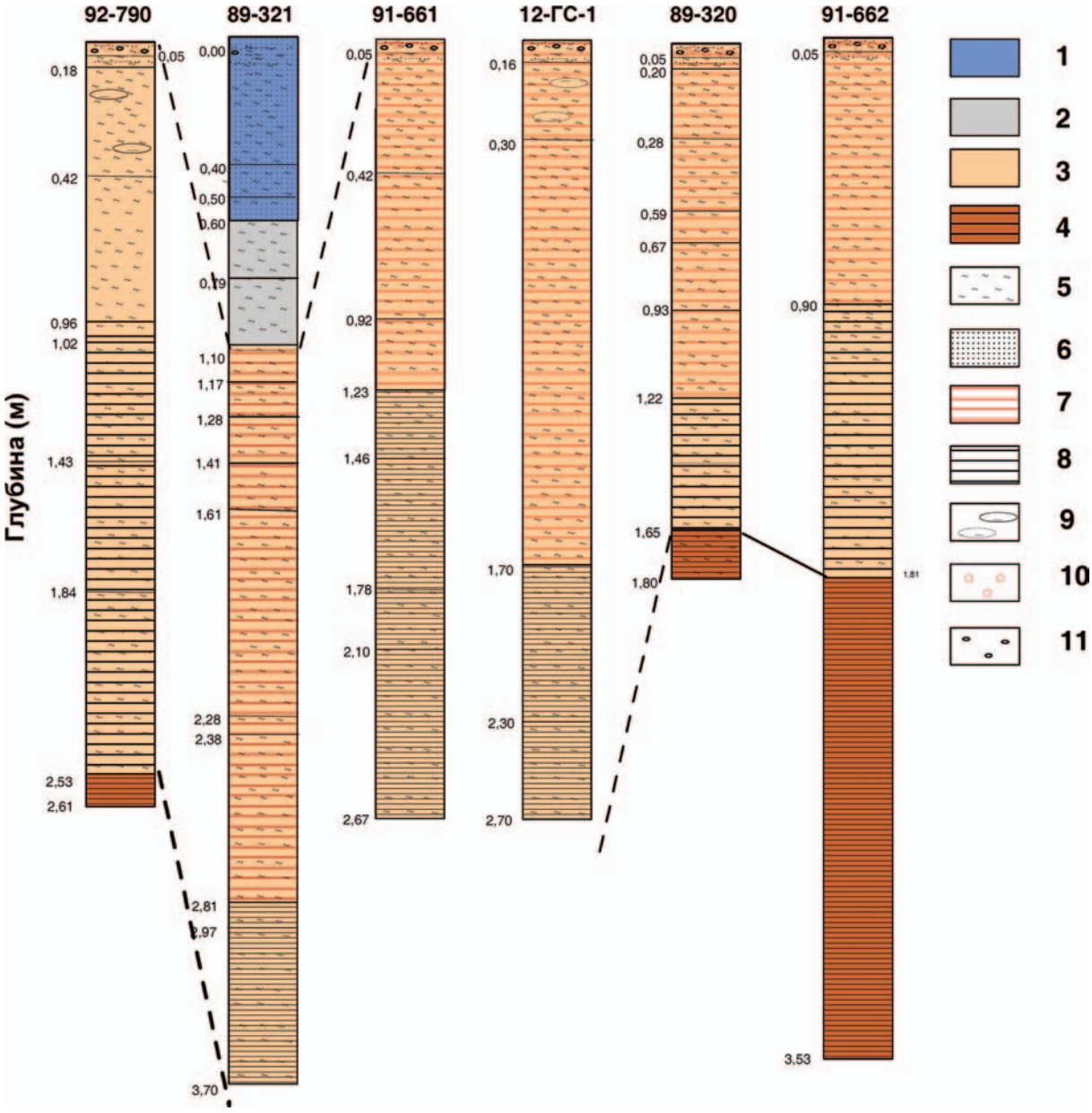

Рис. 9. Геологические разрезы по грунтовым колонкам, отобранным ВСЕГЕИ в Копорском заливе

1 – морские литориновые осадки; *2* – отложения Анцилового озера; *3* – отложения Балтийского ледникового озера; *4* – ленточные глины местных приледниковых озер; *5* – пелиты, глины; *6* – пески; *7* – цветовая полосчатость; *8* – слоистость; *9* – линзовидная слоистость; *10* – железомарганцевые конкреции; *11* – галька, гравий

у прибрежных мелководий (как правило, на глубинах менее 5 м) и поверхности подводных поднятий, одно из которых расположено непосредственно в пределах исследованного поля пок-маков. Морена представлена несортированными отложениями, в гранулометрическом составе которых присутствует весь спектр частиц – от глинистых до валунных. На поверхности дна в зоне волнового воздействия ледниковые отложения перекрыты бронирующим чехлом грубообломочных осадков (валуны, галька, гравий).

На разрезах НСП между мореной и слоистыми ледниково-озерными отложениями выделяется однородная толща предположительно песчаных флювиогляциальных отложений (рис. 10). Выше них залегает толща слоистых отложений, которые, судя по характеру акустической картины, относятся к ледниково-озерным. На поверхности дна они перекрыты лишь маломощным слоем покровных песков (рис. 10), что вполне согласуется с данными, полученными при проведении ГСШ-200, когда в этом районе практически на всех станциях пробоотбора были вскрыты ледниково-озерные отложения (рис. 9).

В основании разреза ледниково-озерной толщи залегают ленточные глины, соотносимые с отложениями местных приледниковых озер. Они обладают высокой фациальной изменчивостью как по латерали, так и по вертикали – от тонкослоистых осадков до песчаных глин с гравием и галькой. В преобладающем числе колонок, отобранных в этом районе при проведении ГСШ-200, они представляют собой ленточное переслаивание глин и песчано-глинистых алевритов. Мощность глинистых слойков в 2–5 раз превышает мощность алевритовых (4–10 и 1–2 мм). Мощность слойков

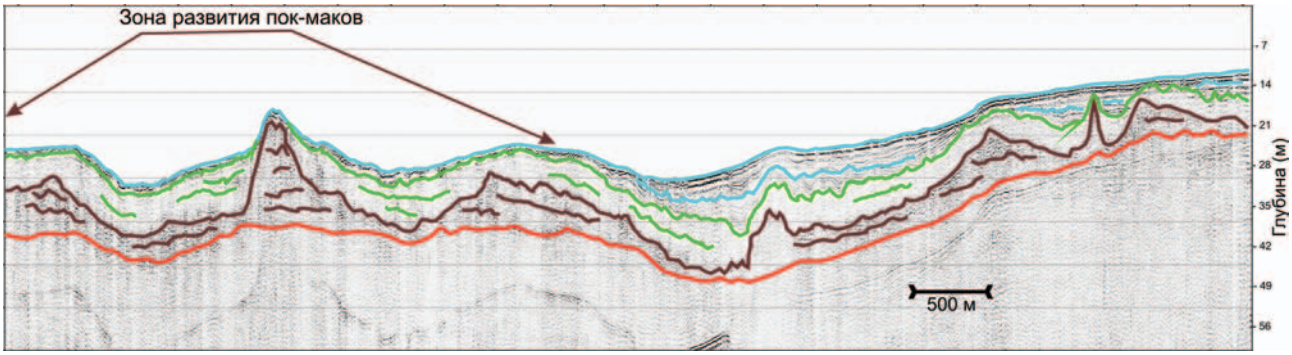

Рис. 10. Геологическая интерпретация профиля НСП, пересекающего поле пок-маков: красная линия – кровля пород венда, коричневая – морены, зеленая – предположительно кровля флювиогляциальных отложений, нижняя голубая линия – предположительная граница между ленточными глинами местных приледниковых озер и отложениями Балтийского ледникового озера, верхняя голубая – поверхность дна

обычно возрастает вниз по интервалу, в этом же направлении увеличивается и общая песчанистость осадков. В нижней части разреза нередко фиксируются песчаные прослои, а также скопления песка неправильной формы иногда с гравием кристаллических пород и катунами сухих серых алевритов. Гранулометрические анализы описываемых осадков показывают, что тонкие ритмиты ленточной слоистости сложены глинами (медиана от 0,0008 до 0,004 мм), грубые – алевритом. Содержание глинистой фракции составляет в среднем около 50 или чуть более, алевритовой от 10 до 30, песчаной не выше 20%. Породообразующие минералы легкой фракции представлены кварцем 75–89, полевым шпатом 10–20, обломками пород до 3%. Состав глинистых минералов: иллит 60–80, хлорит 9–15, каолинит 10–20%.

Наиболее тонкозернистые отложения четвертичного разреза времени максимального развития Балтийского ледникового озера (БЛО) представлены глинами и алевроглинами (Md = 0,0005–0,005 мм) с содержанием частиц менее 0,01 мм – 80–95, а менее 0,001 – 40–60%. Характерно увеличение вверх по разрезу содержания глинистой фракции, сопровождаемое уменьшением количества песчаных частиц медианного размера. Глинистые минералы представлены иллитом 70–85, каолинитом 5–20, хлоритом 7–15%. Легкая фракция песчаной размерности состоит из кварца 70–85, полевых шпатов 15–30 и обломков пород до 6%. Выход тяжелых минералов в алевропесчаной фракции в среднем 0,8–1,2, в отдельных пробах до 3–20%. Увеличение содержания тяжелой фракции связано с ростом количества аутигенных минералов, главным остается барит. Суммарная мощность ледниково-озерных отложений может достигать 10 м, однако в зоне распространения пок-маков их мощность не превышает первых метров (рис. 10). Физико-механические свойства ледниковых и озерно-ледниковых отложений приведены в табл. 1.

Результаты пробоотбора 2012 г. показали, что, как и было установлено ранее, в районе развития пок-маков на поверхности дна отсутствует слой морских литориновых и постлиториновых голоценовых илов. Донные поверхностные осадки мощностью 10–20 см представлены песками и алевритами (табл. 2), сформировавшимися на эрозионной поверхности верхненеоплейстоценовых ледниково-озерных отложений. Пески, как правило, плохо сортированы, включают зерна гравийно-галечной размерности. На ряде станций, по данным пробоотбора, отмечены дисковидные железомарганцевые конкреции диаметром до 3–5 см, а также грубообломочный материал, покрытый корками железомарганцевых окислов.

Распределение пок-маков по площади. Анализ распределения пок-маков по площади полигона исследования (рис. 11, врезка 1), показывает, что основанная масса кратеров локализована по периферии подводного поднятия округлой формы, сложенного, по данным НСП, ледниковыми отложениями (рис. 8), а также в юго-восточной части, где практически на поверхность дна выходят ледниково-озерные отложения (рис. 11, врезка 2).

Выявлены некоторые детали строения, а также существующие различия в морфологии пок-маков, проведена их предварительная классификация или ранжирование по возрасту. Достаточно определенно

Таблица 1

Физико-механические свойства четвертичных отложений дна Финского залива по материалам ГСШ-200

Горизонт	Кол-во проб	Влажность, $W_{ест.}$, %			Плотность, г/см^3			Пластичность, %			Ед. вес, г/см^3	Сцепление, кПа
								W_L	W_P	J_p		
		max	min	ср	max	min	ср	ср	ср	ср	ср	
lgIIIbl	76	110	43	72	1,81	1,42	1,60	39	20	19	2,76	2–3
lgIIIos	58	92	32	69	2,01	1,47	1,61	51	26	25	2,80	3–4
gIIIos	13	45	20	32	2,09	1,76	1,96	22	13	9	2,73	>5

lgIIIbl – глины Балтийского ледникового озера, lgIIIos – ленточные глины местных приледниковых озер, gIIIos – морена.

Таблица 2

Отложения, опробованные в 2012 г.

Ст. 12-ГС-1, 59°59,501 с.ш., 28°59,343 в.д.	Ст. 12-ГС-2, 59°58,510 с.ш., 29°00,187 в.д.
0–16 см – горизонты, описанные в ковшовой пробе. В осадке валун размером 5 × 7 × 5 см. Нижний контакт резкий, с карманами. 16–30 см – очень пестрый горизонт, не характерный для БЛО. Линзоватая слоистость – коричневые прослои мощностью в доли миллиметра. 30–170 см – полосчатые гомогенные буровато-серые однородные глины. На горизонте 153 см два горизонтальных прослоя серого алеврита мощностью 1–1,5 мм. 170–230 см – тонко горизонтальнослоистые глины с дислокациями слоистости. 230–270 см – цвет осадка меняется на коричневатый. Слоистые ленточноподобные глины	0–2 см – с поверхности зона окисления бурого алевроглинистого наилка с примесью песка. 2–7 см – алевроглинистый песок черный с мелким гравием гранитоидов и единичными ЖМК (дисковидные, диаметром до 1 см, уплощенные). 7–20 см – алевроглины с большой примесью песка и единичными гравийными зернами, бежевато-серые. Нижний контакт резкий, с карманами. 20–99 см – гомогенные полосчатые глины, полосы серые и красновато-бежевые. В интервале 30 см – 2 мм прослой серого алеврита. В интервалах 39, 54, 62 см – линзы серого алеврита мощностью до 2, длиной до 5 мм. 99–143 см – те же глины, но с большим количеством линз серого алеврита. Полосы изогнуты. Мощность слойков (мощность ритма) в интервалах 99–100 и 129–140 см – около 5–7 мм, в интервале 110–129 см – 3–4 мм. 143–145 см – два мощных (до 3 мм) слойка серых алевритов, между ними бурый прослой глины мощностью 7 см. 145–220 см – ленточноподобные глины. Слойки слегка наклонные (преимущественно серого тона). Мощность ритма до интервала 180 см 5–6 мм, 180–202 см – 3–4, ниже – 5–6 мм. В интервалах 154 и 161 см – прослой серых алевритов мощностью до 2 мм. 220–245 см – те же ленточноподобные глины. Цвет бурый, на 224 см два наиболее мощных прослоя алеврита

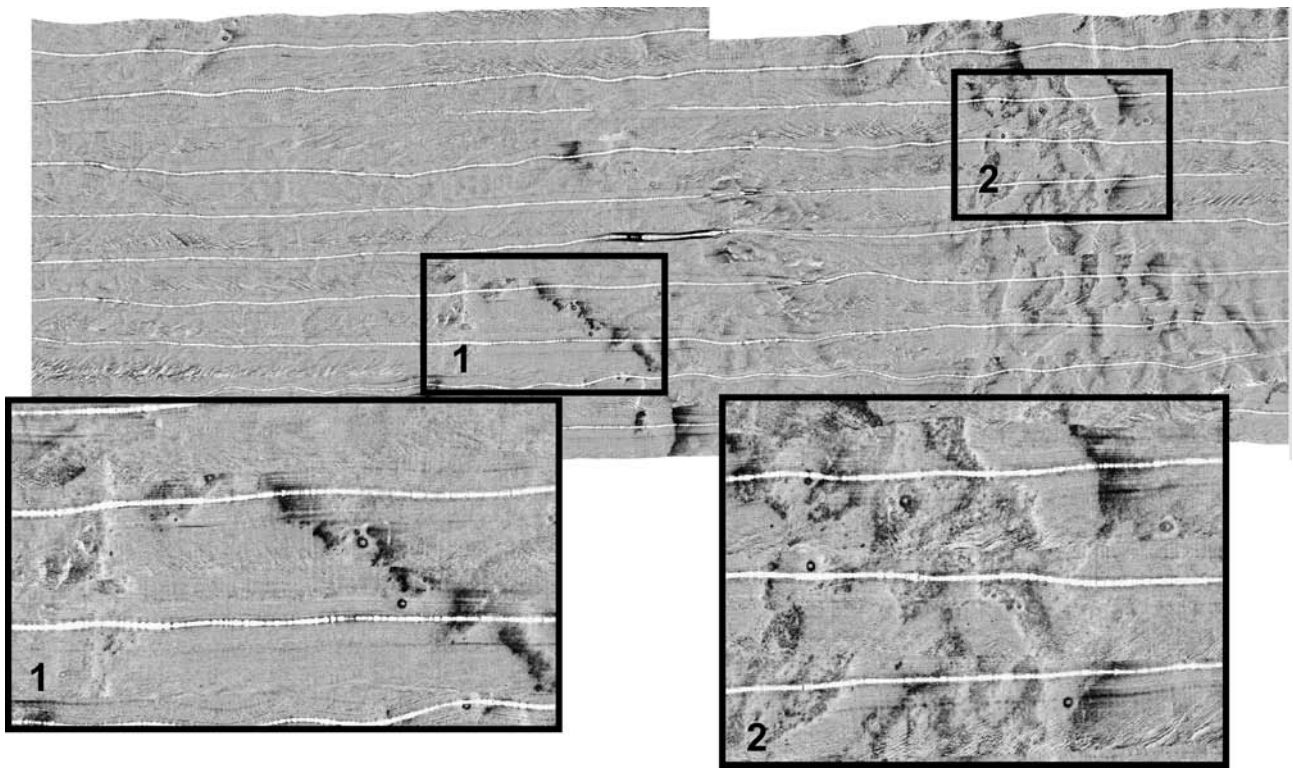

Рис. 11. Распределение пок-маков по площади на схеме-мозаике ГЛБО

выделились молодые (возможно, действующие) формы, а также пок-маки двух более ранних генераций. Молодые (действующие) формы имеют ограниченный внешний отвал, близкий к окружности или овалу. У них же существует оформленный кратер в виде микроконуса, иногда совмещенный с фрагментами эксплозивной брекчии в виде глинистых или алевритовых микроблоков.

В составе более ранних генераций пок-маков выделяются т. н. зрелые формы. Главной их отличительной чертой служит отсутствие четко выраженного кратера. К реликтовым формам пок-маков относятся образования различных очертаний без четко ограниченных морфологических элементов (кальдеры, валы). В ряде случаев классификация нарушается вследствие наложения или непосредственного совмещения пок-маков разного возраста.

Исследование газовой составляющей в пробах осадков. Станция 12-ГС-1 располагалась в районе локализации одиночного кратера, станция 12-ГС-2 – в зоне скопления кратерообразных структур на глубине около 26 м. По литологическому описанию (табл. 2) отобранные осадки сходны.

Содержание метана в осадках станций 12-ГС-1 и 12-ГС-2 было достаточно низким и не превышало 0,2 мл/дм^3 влажного осадка. Вместе с тем на ст. 12-ГС-2, расположенной в зоне скопления кратеров, концентрация метана в осадках была почти на порядок выше, чем на ст. 12-ГС-1 (рис. 12). Следует отметить, что максимальные концентрации CH_4 на ст. 12-ГС-2 наблюдались на горизонте 25–100 см, а затем содержание этого газа по разрезу колонки заметно снижалось. Таким образом, данные содержания метана в исследованных осадках исключают предположение об образовании кратерообразных структур в результате разгрузки газов, накопившихся в голоценовых илах.

Более высокое содержание метана в осадках ст. 12-ГС-2 может объясняться более активными процессами его микробного образования. Однако это предположение представляется маловероятным, поскольку никаких признаков повышения активности микробиологических процессов в зоне скопления кратеров (ст. 12-ГС-2) нами обнаружено не было. Крайне низкое содержание органического вещества, отсутствие заметного снижения сульфат-ионов в поровых водах по длине колонки, нулевые значения интенсивностей микробных процессов сульфатредукции и метаногенеза, измеренных радиоизотопным методом, указывают на слабое протекание диагенетических процессов в исследованных осадках. Наиболее вероятно, что повышенное содержание метана в осадках ст. 12-ГС-2 может быть следствием близости отобранной колонки к зоне современной разгрузки подземных вод вендского комплекса.

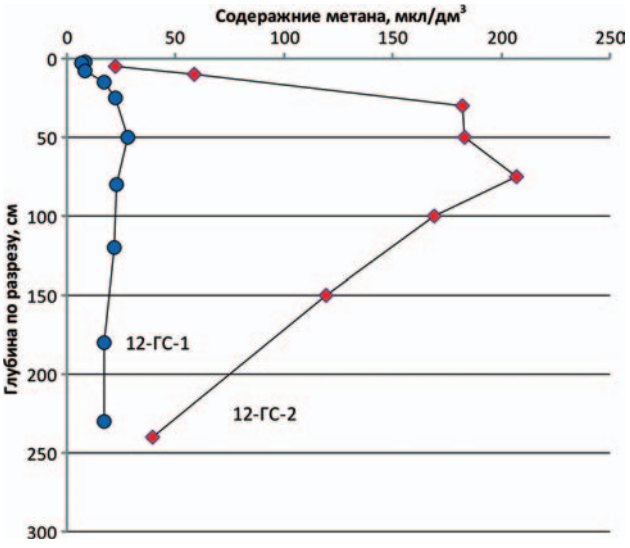

Рис. 12. Содержание метана в грунтовых колонках Копорского залива

Гидрохимические исследования. На станциях 12-ГС-1 и 12-ГС-2 были также отобраны пробы придоннной воды. Установлено, что эти воды в районе расположения пок-маков характеризуются высокими содержаниями ряда микро- и макрокомпонентов. Концентрации таких макрокомпонентов, как K, Na, Mg, Ca, Li, на порядок и более превосходят их фоновые значения для района (табл. 3). Значительно повышены по отношению к фону и концентрации таких элементов, как Cr, Ni, As, Se. Отмечен явный дефицит Pb, La, Cd. Концентрации Cl, Mn и Fe близки к фоновым. Заметного различия в концентрациях основных химических элементов между станциями опробования не выявлено.

Недостаточное количество отобранных проб не позволяет провести статистическую обработку данных и сопоставить полученные результаты с литературными данными по известным в регионе водоносным горизонтам. Но учитывая высокие концентрации K, Na, Mg, Ca и близкие к фоновым концентрации Cl и Fe, можно с определённой вероятностью предположить, что в данном случае имеет место разгрузка пресных вод северной части вендского водоносного комплекса, характеризующегося гидрокарбонатными натриевыми, кальциево-магниевыми водами.

Выводы. Пок-маки широко распространены в восточной части Финского залива, что указывает на периодическую активную миграцию газофлюидов из геологического разреза к поверхности морского дна и в водную толщу. Существенные различия в

Таблица 3

Концентрации химических элементов в придонных пробах воды (мкг/л)

Станции	Li	Na	Mg	P	Ca	K	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	As
12-ГС-1	47,60	1 977 800	133 300	20,0	52 800	42 900	8,04	4,36	4,16	169	0,300	5,98	3,02	3,36
12-ГС-2	48,30	1 938 400	133 300	19,7	57 000	45 200	9,18	4,67	13,40	181	0,310	3,74	2,75	4,37
Фоновые концентрации	1,04	26471	5240	31,8	2095	6000	2,41	0,38	10,4	197	0,145	1,24	3,68	0,29

геологическом строении морского дна на участках проявления пок-маков указывают на то, что эти формы могут иметь разное происхождение, в том числе и связанное с миграцией глубинных флюидов по разрывным нарушениям. Образование пок-маков, установленных в центральной части залива в районах устойчивого накопления алевро-пелитовых илов, по-видимому, обусловлено формированием газонасыщенных осадков за счет активности современных процессов трансформации органического вещества микробным сообществом, результатом жизнедеятельности которого является образование значительных количеств восстановленных газов – метана и сероводорода. В северо-восточной части Копорского залива, судя по полученным данным, отсутствует связь образования пок-маков с выходами биогенных газов, так как на этом участке развиты ледниковые и водноледниковые отложения, крайне обедненные органическим веществом. Можно предполагать, что определенная часть пок-маков в северо-восточной части Копорского залива обусловлена разгрузкой подземных вод Вендского водоносного комплекса. Обращает на себя внимание пространственная близость или совмещение поля пок-маков с разрывными нарушениями субширотного простирания и оперяющими их зонами трещиноватости, что может способствовать выходу флюидов (газов) глубинного происхождения.

Совмещение в одном районе глубинного разлома, зон трещиноватостей и водоносных горизонтов создает предпосылки для образования пок-маков, возникающих за счет разгрузки подземных вод, либо подводных выходов газов и вод глубинного происхождения, либо комплекса этих факторов. Наличие разновозрастных генераций пок-маков с выделением молодых, зрелых и реликтовых разностей указывает на пульсационный характер их возникновения, что может быть индикатором активизации глубинных тектонических процессов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ВСЕГЕИ Л. М. Буданову, А. Ю. Сергееву, Б. В. Степанову за помощь в обработке экспедиционного материала, а также капитану НИС «Ладога» В. А. Снетко. Работа частично выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ-11-05-01093-а и TOPCONS по программе ENPI.

1. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / Гл. ред. О.В. Петров. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – 78 с.

2. *Геодекян А.А., Троцюк В.Я.* Газовые кратеры на дне Балтики – индикаторы процессов миграции углеводородов из недр // Геоакустические и газо-литогеохимические исследования в Балтийском море. Геологические особенности разгрузки флюидных потоков / Под ред. А.А. Геодекяна, В.Я. Троцюка, А.И. Блажчишина. – М.: ИО АН СССР, 1990. – С. 6–11.

3. Гидрогеология СССР. Ленинградская, Псковская, Новгородская области. – М.: Мингео РСФСР, 1967. Т. 3. Ч. 1. – 328 с.

4. Гидрогеология СССР. Ленинградская, Псковская, Новгородская области. – М.: Мингео РСФСР, 1968. Т. 3. Ч. 2. – 63 с.

5. *Иванова В.В., Кириевская Д.В., Болотов А.Е.* Геохимическая характеристика донных отложений в зоне покмарков в восточной части Финского залива // Балтийский регион. – Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2011. 1 (7). – С. 78–89.

6. Информационный бюллетень № 11. Состояние геологической среды прибрежно-шельфовой зоны Баренцева, Белого и Балтийского морей. – СПб.: ФГУНПП «Севморгео», 2009. – 34 с.

7. *Коротков А.И.* Среднерусский артезианский бассейн: Учебное пособие. – Л.: Изд-во ЛГИ им. Плеханова, 1982. – 61 с.

8. *Малаховский Д.Б., Амантов А.В.* Геолого-геоморфологические аномалии на севере Европы // Геоморфология. 1991. № 1. – С. 85–95.

9. *Пименов Н.В., Канапацкий Т.А., Сигалевич П.А.* и др. Сульфатредукция, образование и окисление метана в голоценовых осадках Выборгского залива Балтийского моря // Микробиология. 2012. Т. 81. № 1. – С. 84–95.

10. *Amantov A., Fjeldskaar W., Cathles L.M.* Glacial erosion of the Baltic Sea region, and the effect on the post-glacial uplift / J. Harff, S. Björck, P. Hoth (eds) // The Baltic Sea Basin. Springer. 2011. – P. 53–75.

11. Baltic Gas. Final scientific report / Eds: B.B. Jørgensen, H. Fossing. 2011. – 67 p. (http://www.bonusportal.org/files/1597/BALTIC_GAS_FINAL_REPORT.pdf).

12. *Chand S.* et al. Gas hydrate stability zone modeling in areas of salt tectonics and pockmarks of the Barents Sea suggest an active hydrocarbon venting system / Chand S., Mienert J., Andreassen K., Knies J., Plassen L., Fotland B. // Marine and Petroleum Geology. 2008. Vol. 25. – P. 625–636.

13. *Dehls J.F., Olesen O., Olsen L., Blikra L.H.* Neotectonic faulting in northern Norway; the Stuoragurra and Nordmannvikdalen postglacial faults // Quatern. Sci. Rev. 2000. Vol. 19. – P. 1447–1460.

14. *Egorov A.V., Ivanov M.K.* Hydrocarbon gases in sediments and mud breccias from the central and eastern part of the Mediterranean Ridge // Geo-Mar. Lett. 1998. Vol. 18. – P. 127–138.

15. *Fader G.B.J.* Gas-related sedimentary features from the eastern Canadian continental shelf // Continent. Shelf Res. 1991. Vol. 11. N 8–10. – P. 1123–1153.

16. *Field M., Jennings A.E.* Seafloor gas seeps triggered by a northern California earthquake // Marine Geol. 1987. Vol. 77. – P. 3951.

17. *Forwick M., Baeten N.J., Vorren T.O.* Pockmarks in Spitsbergen fjords // Norwegian J. of Geol. 2009. Vol. 89. – P. 65–77.

18. *Gontz A.M., Belknap D.F., Kelley J.T.* Seafloor features and characteristics of the Black Kedges Area, Penobscot Bay, Maine, USA // J. Coast Res. 2002. Vol. 36. – P. 333–339.

19. *Hammer O., Webb K.E.* Piston coring of Inner Oslofjord Pockmarks, Norway: constraints on age and mechanism // Norwegian J. of Geol. 2010. Vol. 90. – P. 79–91.

20. *Hasiotis T., Papatheodorou G., Kastanos N., Ferentinos G.* A pockmark field in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 14/7/93 seismic event // Marine Geology. 1996. Vol. 130. – P. 333–344.

21. *Hovland M., Judd A.* Seabed pockmarks and seepages: impact on geology, biology and the marine environment. – London: Graham & Trotman, 1988. – 293 p.

22. *Kelley J.T., Dickson S.M., Belknap D.F.* et al. Giant sea-bed pockmarks: evidence for gas escape from Belfast Bay, Maine // Geology. 1994. Vol. 22. – P. 59–62.

23. *King L.H., McLean B.* Pockmarks on the Scotian Shelf // Geol. Soc. of Amer. Bull. 1970. Vol. 81. – P. 3141–3148.

24. *Martens C.S., Albert D.B., Alperin M.J.* Stable isotope tracing of anaerobic methane oxidation in the gassy sediments of Eckenforde Bay, German Baltic Sea // Amer. J. of Sci. 1999. Vol. 299. – P. 589–610.

25. *Paull C.K., Ussler W. III, Borowski W.S.* Freshwater ice rafting: an additional mechanism for the formation of some high-latitude submarine pockmarks // Geo-Marine Lett. 1999. Vol. 19. – P. 164–168.

26. *Pilcher R., Argent J.* Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin // Marine Geol. 2007. Vol. 244. – P. 15–32.

27. *Pimenov N.V., Ulyanova M.O., Kanapatsky T.A.* et al Microbially mediated methane and sulfur cycling in pockmark sediments of the Gdansk Basin, Baltic Sea // Geo-Marine Lett. 2010. Vol. 30 (3–4). – P. 439–448.

28. *Plassen L., Vorren T.O.* Fluid flow features in fjord-fill deposits, Ullsfjorden, North Norway // Norwegian J. of Geol. 2003. Vol. 83. – P. 37–42.

29. *Rogers J.N.* Mapping of subaqueous, gas-related pockmarks in Belfast Bay, Maine using GIS and remote sensing techniques: Master's thesis. University of Maine, Orono, Maine, 1999. – 139 p.

30. *Schubel J.R.* Gas bubbles and the acoustically impenetrable, or turbid, character of some estuarine sediments // Natural Gases in Marine Sediments. New York: Plenum Press, 1974. – P. 275–298.

31. *Soderberg P., Floden T.* Gas seepages, gas eruptions and degassing structures in the seafloor along the Stromrna tectonic lineament in the crystalline Stockholm Archipelago, east Sweden // Continent. Shelf Res. 1992. Vol. 12. N 10. – P. 1157–1171.

32. *Soderberg P., Floden T.* Stratabound submarine terraces and pockmarks – indicators of spring sapping in glacial clay, Stockholm Archipelago, Sweden // Proceedings of the Fourth Marine Geol. Conf. "The Baltic" 24–27 October 1995, Uppsala, Sweden / I. Cato, F. Klingberg (eds.), 1997. SGU series Ca 86. – P. 173–178.

33. *Ulyanova M., Sivkov V., Kanapatskij T.* et al. Methane fluxes in the southeastern Baltic Sea // Geo-Marine Lett. 2012. Vol. 32 (5–6). – P. 535–544.

34. *Whiticar M.J.* Diagenetic relationships of methanogenesis, nutrients, acoustic turbidity, pockmarks and freshwater seepages in Eckernförde Bay // Marine Geol. 2002. Vol. 82, 1–2. – P. 29–53.

35. *Yuan F., Bennell J.D., Davis A.M.* Acoustic and physical characteristics of gassy sediments in the western Irish Sea // Continent. Shelf Res. 1992. Vol. 12. N 10. – P. 1121–1134.

Жамойда Владимир Александрович – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Vladimir_zhamoida@vsegei.ru>.

Рябчук Дарья Владимировна – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Daria_Ryabchuk@vsegei.ru>.

Спиридонов Михаил Александрович – доктор геол.-минер. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ. <Michail_Spiridonov@vsegei.ru>.

Григорьев Андрей Глебович – канд. геол.-минер. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Andrey_Grigiryev@vsegei.ru>.

Пименов Николай Викторович – доктор биол. наук, зам. директора, Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН. <npimenov@mail.ru>.

Амантов Алексей Владиславович – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <4448470@mail.wplus.net>.

Кропачев Юрий Петрович – вед. инженер, ВСЕГЕИ. <Yuri_Kropachev@vsegei.ru>.

Неевин Игорь Александрович – инженер, ВСЕГЕИ. <Igor_Neevin@vsegei.ru>.