

ИЗУЧЕНИЕ ЗОН КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ ГАЗА В АРКТИКЕ НА ОСНОВЕ ПАССИВНОГО МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ОТКРЫТИЕ)

В. И. Богоявленский

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Г. Н. Ерохин

НИИ прикладной информатики и математической геофизики, ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет им. И. Канта (Калининград, Российская Федерация)

Р. А. Никонов, И. В. Богоявленский

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

В. М. Брыксин

НИИ прикладной информатики и математической геофизики, ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет им. И. Канта (Калининград, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 9 января 2020 г.

Впервые для изучения мощных выбросов газа из криолитосферы Земли в Арктике применена технология пассивного микросейсмомониторинга (МСМ) 4D. На основе МСМ 4D в районе глубокого термокарстового озера Открытие выявлена активная ярко выраженная субвертикальная газогидродинамическая зона. По закономерностям распределения микросейсмических событий обоснована миграция пластовых флюидов (в первую очередь газа) из верхнемеловых водогазонасыщенных отложений сеномана с мощными извержениями со дна озера Открытие, в результате которых сформировались гигантские кратеры диаметром до 30–40 м. Метод МСМ 4D способствует решению стоящих задач предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, в связи с чем относится к категории критических технологий.

Ключевые слова: Арктика, полуостров Ямал, озеро Открытие, газогидродинамика, выбросы газа, вулканы, кратеры, микросейсмический мониторинг, микросейсморазведка 4D, дистанционное зондирование Земли.

Введение

В «Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013—2020 годы» отдельно выделено направление «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий» (п. 136), в рамках которого предусматриваются: изучение геокриологических природных опасностей; создание моделей для

прогнозирования опасных гидрологических, гидрохимических, экологических процессов, оценки их риска и масштабов; разработка превентивных мер по смягчению негативных последствий; разработка методов прогноза и предотвращения катастрофических явлений при техногенном преобразовании недр; решение задач геодинамической безопасности объектов добычи нефти и газа. Выявление наиболее опасных зон и объектов потенциальных природных и техногенных выбросов газа, а также предсказание вероятности и времени чрезвычайных событий в отраслях добычи горючих полезных ископаемых (нефти, газа и угля) являются крайне

важными и актуальными задачами, стоящими перед современной наукой.

При освоении месторождений нефти и газа в Арктике в ряду многочисленных опасных природных и техногенных явлений существуют дополнительные угрозы, связанные с экстремальными природно-климатическими особенностями, а также с наличием криолитосферы и криогидросферы. Деградация многолетнемерзлых пород (ММП), происходящая за счет глобального потепления климата, активизировала процесс дегазации Земли на суше и акваториях Арктики. На полуострове Ямал и сопредельных территориях полуостровов Гыданский и Тазовский выявлено более 10 гигантских кратеров выбросов газа с брустверами выброшенной породы [1—7]. Уровень их исследования различен, что обусловлено рядом проблем, главным образом логистических. Кроме того, по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и в результате экспедиционных исследований обнаружено 415 термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на дне и 7185 потенциально опасных многолетних бугров пучения [6].

Ряд перечисленных выше объектов расположен вблизи и даже внутри инфраструктуры уникальных по сложности реализации проектов освоения Бованенковского, Новопортовского и Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатных месторождений. В результате исследования ряда объектов доказано, что разлет кусков льда и мерзлой породы может достигать 400—900 м [1—7]. Кроме того, во всех случаях, когда имелись очевидцы катастрофических выбросов газа, по их свидетельствам, происходили его самовоспламенения и даже взрывы. При этом несколько выбросов газа произошло в непосредственной близости от инфраструктуры нефтегазовых промыслов.

В результате пятилетних исследований доказано, что взрывы сопровождаются значительными быстротечными газогеодинамическими изменениями поверхности Земли, а также дна водоемов. За счет давления газа на поверхности криолитосферы возможно формирование позитивных структур — бугров пучения, в том числе многолетних, а при выбросе газа — негативных объектов — кратеров/покмарок (rockmarks). При региональных исследованиях по данным ДЗЗ и в ходе экспедиций на полуострове Ямал было обосновано, что наиболее газозрывоопасной является его восточная часть с экстремальными зонами к северу и западу от поселка Сеяха (рис. 1), а также в зоне Северо-Тамбейского и Южно-Тамбейского месторождений [6]. Отметим, что к поселку Сеяха приурочен локальный экстремум аномально высоких пластовых давлений (АВПД) по юрским отложениям.

На Сеяхинском участке (S на рис. 1) исследованы два мощных выброса газа. Первый из них (Сеяхинский С11) произошел с самовоспламенением и взрывом газа 28 июня 2017 г. прямо в русле реки Мюдрияха [4]. Второй был обнаружен в марте 2019 г. по крупной пробоине во льду термокарстового озера

Открытие [5]. Название этому озеру было дано авторами в связи с уникальностью выявленных и изученных на нем газогидродинамических процессов.

В ходе комплексных исследований выбросов газа со дна реки и ряда термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на дне (включая озеро Открытие) на Сеяхинском участке было впервые доказано, что они обладают большой мощностью, способной разбить лед толщиной около 1,5 м, сформировать крупные зоны его деструкции диаметром в десятки метров (по факту до 15—45 м) и разбросать крупные глыбы льда на удалениях свыше 50 м от эпицентра взрыва [5]. В зоне существования ММП на полуострове Ямал установлены ярко выраженные неоднократные многолетние наземные и подводные (со дна озер и реки Мюдрияха) извержения (выбросы) газов, которые можно обосновать вулканическим механизмом [4—6]. Кроме того, была показана связь расположения выявленных озер с признаками сильной эмиссии газа с региональным тектоническим строением и глубинными разломами Южно-Карского региона [5; 6; 8].

В 2018—2019 гг. на ряде объектов полуострова Ямал авторами были проведены уникальные по комплексу технического оснащения экспедиции по изучению криосферы и дегазации Земли. Геолого-геофизические исследования включали: эхолокацию, георадиолокацию, активную минисейсморазведку МОГТ 2D-3D, пассивную микросейсморазведку 4D, бурение неглубоких скважин, гидротермометрию водоемов и азросъемку (вертолет и БПЛА) и др. [6]. С помощью эхолокации и георадиолокации на дне озера Открытие подтверждены выявленные по данным ДЗЗ четыре крупных кратера, расположенные в западной части озера по линии предполагаемого разлома (зоны субвертикальной трещиноватости) с ориентацией СЗ-ЮВ азимут 245°, включая кратер, из которого в марте 2019 г. произошел мощный выброс газа, разбивший лед (рис. 2). В качестве примера на рис. 2б и 2в приведены две эхограммы по двум участкам эхолокационных профилей общей протяженностью около 41 км, которыми было исследовано дно озера Открытие для построения 3D моделей. Эти эхограммы четко отображают северный и южный кратеры из линейной группы четырех кратеров. Также обнаружены несколько невидимых из космоса кратеров и оползни извергнутой из жерл породы

Самые близкие к озеру Открытие нефтегазописковые Сеяхинские скважины № 1, 2 и 4 (забой 2500—3300 м) расположены севернее и северо-восточнее на значительных удалениях в 24,5—26,3 км, а ближайшее Арктическое месторождение находится в 54 км к юго-западу [5]. В связи с этим техногенные притоки газа к данному озеру маловероятны. Поэтому особый интерес приобретает выяснение причин происходящих катастрофических выбросов газа со значительными необратимыми изменениями ландшафта.

В 2019 г. принципиально новым направлением в исследованиях выбросов газа на Ямале и в Арк-



Рис. 1. Район исследований на полуострове Ямал с озером Открытие. Обозначения: 1 – участки детальных исследований (S – Сеяхинский, N – Нейтинский, NS – Северо-Сеяхинский, WS – Западно-Сеяхинский); 2 – месторождения; 3 – Сеяхинский кратер выброса газа C11; 4 и 5 – озера с кратерами выбросов газа (4), включая озеро Открытие D (5); 6 – железная дорога. Картографическая основа – ESRI

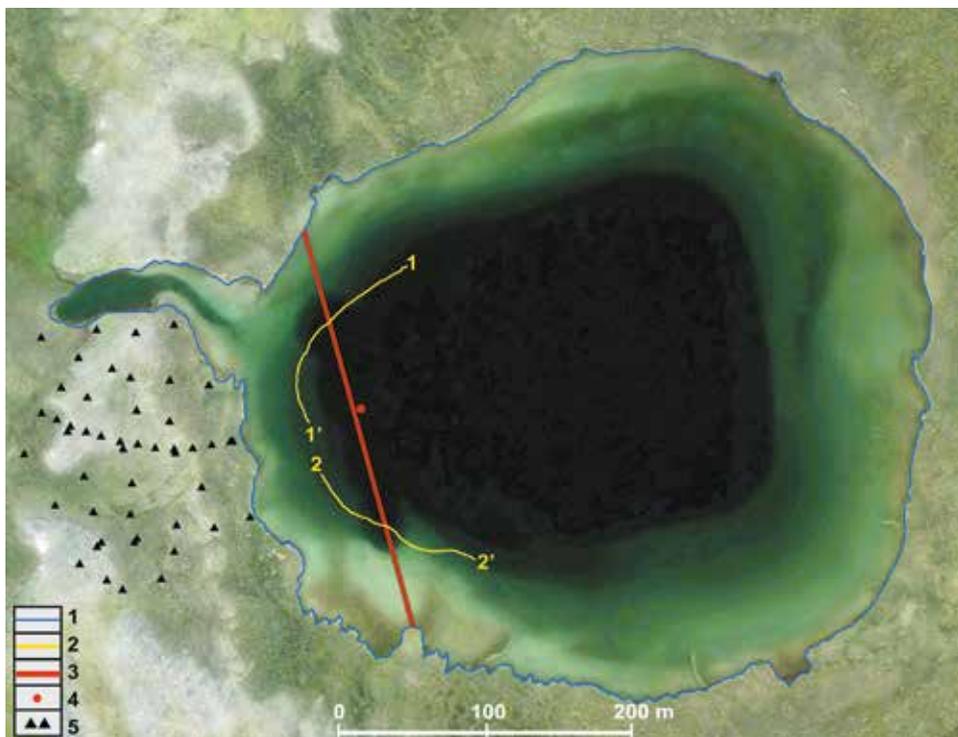
Fig. 1. The research area on the Yamal Peninsula with Lake Otkrytiye. Legend: 1 – sites of the OGRI RAS detailed studies (S – Seyakhinsky, N – Neytinsky, NS – North Seyakhinsky, WS – West Seyakhinsky); 2 – gas fields; 3 – Seyakhinsky gas blowout crater C11; 4 and 5 – thermokarst lakes with craters of gas blowout (4), including Lake Otkrytiye D (5); 6 – railway. Basemap – ESRI

тике в целом явился микросейсмический мониторинг — МСМ (пассивная микросейсмозащита 4D), который, как уже было показано в ряде работ [9—19], позволяет выявлять микросейсмические события (МСС — микроземлетрясения / упругие колебания), имеющие природный или искусственный генезис.

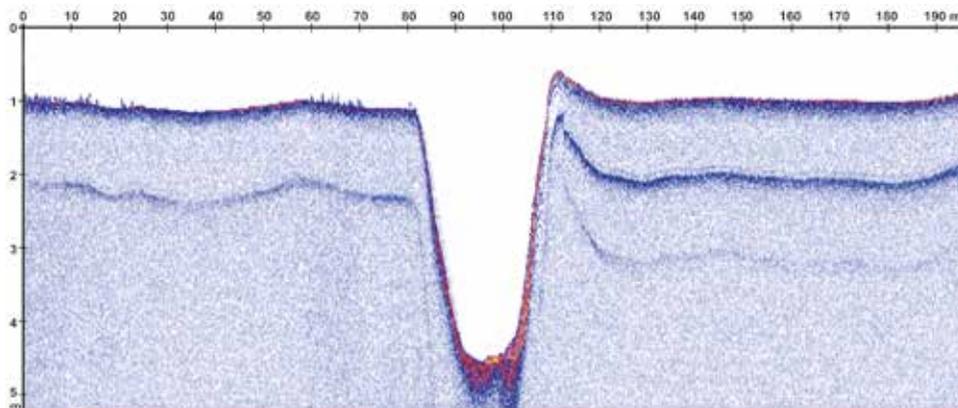
Технология полевых исследований и обработки данных микросейсмического мониторинга

МСМ позволяет успешно решать ряд задач, включая контроль многостадийного гидравлического разрыва пласта (ГРП), регистрируя инициируемые ГРП

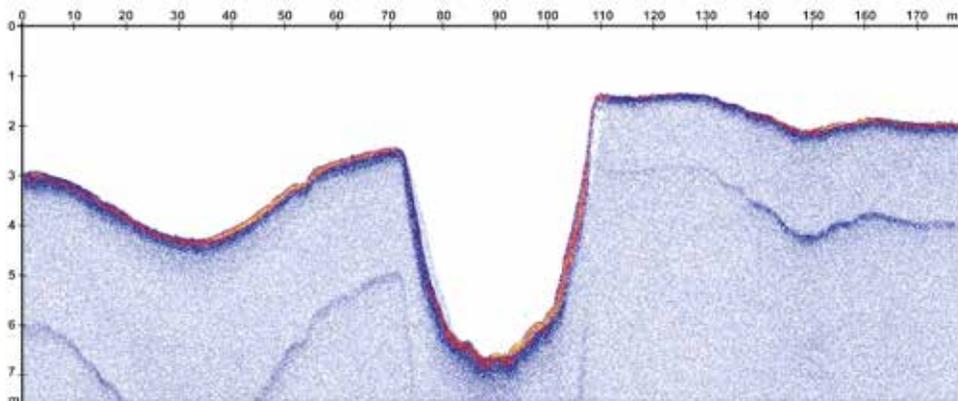
сильные МСС, возникающие при растрескивании горных пород, вызванном прорывом закачиваемой воды (искусственный источник) [9—17 и др.]. Подобные процессы протекают в среде при субвертикальной миграции пластовых флюидов (воды, жидких углеводородов и в первую очередь газа), стремящихся прорваться на поверхность Земли под действием пластовых давлений и сил гравитации. При этом АВГД способны нарушить сплошность пластов горных пород и сформировать субвертикальные каналы миграции газа или грязевогазовых смесей при грязевом вулканизме. Известно успешное применение МСМ для изучения эруптивных каналов грязевых вулканов [18 и др.].



а



б



в

Рис. 2. Озеро Открытие: космоснимок WorldView-4 26.08.2018 (а) и профили эхолотации 1-1' (б) и 2-2' (в) через кратеры выбросов газа. Обозначения: 1 – береговая линия, 2 – профили эхолотации, 3 – прогнозируемый разлом, 4 – эпицентр выброса газа в марте 2019 г., 5 – сейсмоприемники для МСМ

Fig. 2. Lake Otkrytiye: satellite image WorldView-4 26.08.2018 (a) and echolocation profiles 1-1' (б) and 2-2' (в) through the gas blowout craters. Legend: 1 – coastline, 2 – echolocation profiles, 3 – predicted fault, 4 – gas blowout epicenter in March 2019, seismic receivers for MSM

Исследования МСМ в районе озера Открытие проводились с ориентацией на последующее применение при обработке зарегистрированных волновых полей математического аппарата теории тензора сейсмического момента, реализованного в работе [11]. Метод MSPRM (MicroSeismic Permanent Reservoir Monitoring) был разработан и впервые опробован в 2002 г. в Югорском НИИ информационных технологий (Ханты-Мансийск) [12—14] для микросейсмического контроля многостадийного ГРП по данным поверхностной регистрации МСС, возникающих при разрыве сплошности пород. В отличие от энергетического подхода PSET (Passive Seismic Emission Tomography) [19] метод обладает мобильностью и компактностью. Обычно система наблюдений разворачивается в течение суток на площади до 1 км² и состоит из 30—70 каналов регистрации (сейсмоприемники).

Метод MSPRM прошел верификацию при решении различных задач, в том числе в более чем 50 процессах ГРП, и показал высокую эффективность [14—17]. Технология поверхностного пассивного МСМ также применима для контроля менее интенсивных, но более длительных, чем ГРП, процессов, возникающих внутри Земли вследствие естественных или искусственных причин. К таким причинам можно отнести МСС в процессе вытеснения нефти при водонагнетании [16] или естественном замещении нефти пластовой водой [17].

Полевые работы МСМ в районе озера Открытие ставили цель изучить микросейсмическую активность, возможно, связанную с пространственной неоднородностью миграции газов или приуроченную к структурным геологическим неоднородностям. К таким неоднородностям относятся каналы миграции газа, возникающие в ослабленных субвертикальными разломами и системами трещиноватости зонах и, в частном случае, «газовые трубы» (gas chimney, gas pipes) [1—6].

В августе 2019 г. при МСМ на западном берегу озера Открытие на участке 150×200 м (см. рис. 2а) была установлена малоразмерная регистрирующая антенна из 42 одноканальных сейсмоприемников GS-ONE бескабельной сейсмосистемы SCOUT (спектральный диапазон 10—200 Гц) разработки АО «СКБ СП» [20] и 6 экспериментальных сейсмоприемников МФТИ. 14—17 августа 2019 г. регистрация сигналов, впервые для опыта применения метода MSPRM, проводилась с высокой частотой дискретизации — 4 кГц (0,25 мс), реализованной в технических возможностях сейсмоприемников

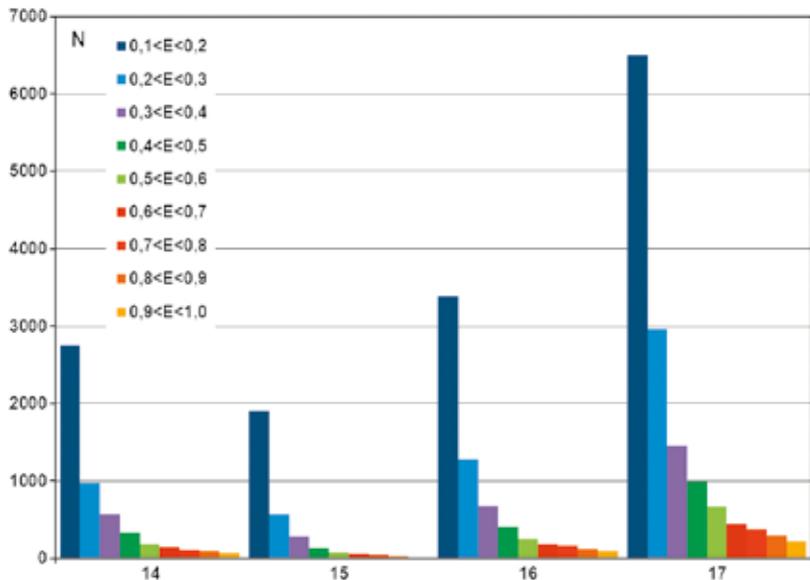


Рис. 3. Диаграммы распределения количества МСС (N) по дням (14, 15, 16 и 17 августа) и энергии (от 0,1 до 1,0 кДж)
Fig. 3. Quantity distribution diagrams of microseismic events – MSE (N) by days (August 14, 15, 16 and 17) and energy (from 0,1 to 1,0 kJ)

GS-ONE SCOUT. Размеры регистрирующей антенны и частота дискретизации сигнала выбраны на основе предварительного имитационного математического моделирования, гарантирующего устойчивую локацию событий в кубе размером 2×2×2 км, в котором поверхностная антенна располагается в центре верхней поверхности куба. Фактический период непрерывной регистрации МСС на озере Открытие составил четверо суток.

В результате обработки данных по методу MSPRM было зафиксировано около 201 тыс. МСС. Для каждого из событий определялись пространственные координаты в системе WGS 84, абсолютное время начала события (по Гринвичу) и три главных напряжения тензора сейсмического момента [11]. При обработке МСС была исключена большая часть самых слабых событий (до 0,1 кДж), в результате чего для последующего анализа и интерпретации было выделено 28 769 МСС (14,3%) с энергией в диапазоне 0,1—1,0 кДж. Ниже приведены результаты статистического анализа данных МСМ и результаты их интерпретации.

Особенности микросейсмических событий на озере Открытие

Информация о 28769 МСС, полученная при обработке сейсмических записей в пакете MSPRM, включающая их географические координаты, глубину, время и энергию, была подвергнута всестороннему статистическому анализу. В частности, на рис. 3 приведены диаграммы распределения количества МСС (N) для 9 диапазонов энергии от 0,1 до 1,0 кДж (шаг 0,1) по четырем дням регистрации (14, 15, 16 и 17 августа). Из данных диаграмм следует, что наибольшее количество МСС постоянно регистрируется

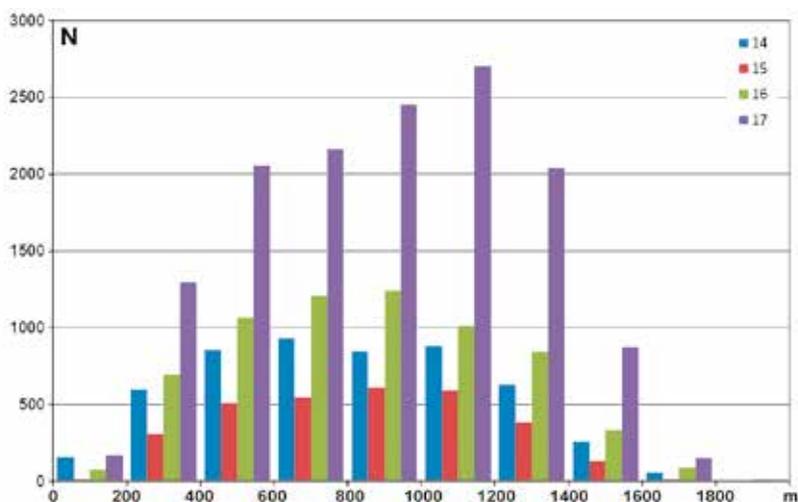


Рис.4. Диаграммы распределения количества МСС (N) по дням (14, 15, 16 и 17 августа) и глубине (0–2000 м)
 Fig. 4. Quantity distribution diagrams of microseismic events – MSE (N) by days (August 14, 15, 16 and 17) and depth (0–2000 м)

для относительно слабых событий, а наименьшее — для наиболее сильных. Кроме того, видно, что 15 и 17 августа являются днями наименьшего и наибольшего количества МСС.

Активизация геосреды и МСС 16 и 17 августа может быть связана с близкими или удаленными землетрясениями, что было доказано ранее для разных регионов мира, включая Черное море (Крымское землетрясение 1927 г.) и Охотское море [1; 21]. Наиболее близкие землетрясения в период 14–17 августа были зарегистрированы USGS 15 и 16 августа на расстояниях около 3,7 тыс. км к югу в Северном Иране (магнитуда M 5,1) и около 5 тыс. км к юго-востоку в Японии (M 5,4). Однако столь значительные удаления и относительно небольшие магнитуды данных сейсмических событий ставят под сомнение, но не исключают фактор влияния землетрясений.

На рис. 4 приведена диаграмма распределения количества МСС по их глубине (0–2000 м) в зависимости от дней наблюдения. Самые глубокие МСС зарегистрированы на глубине около 2000 м, на которой находится кровля отражающего горизонта «M¹» (нижний мел, апт, пласт ТП1, глубина 1954–2002 м). Значительная часть МСС сосредоточена ниже глубины 1130 м, соответствующей сейсмическому горизонту «Г» — кровля сеноманского регионально газоносного комплекса (верхний мел, марсалинская свита, пласт ПК₁, глубина 1116–1142 м). Максимальное количество событий 17 августа произошло в интервале глубин 1000–1200 м, в котором находится кровля сейсмического горизонта «Г», а в предыдущие дни — на 200–400 м выше.

На рис. 5 для участка 2×2 км с центром в районе расстановки группы сейсмоприемников (СП) представлены три картографические схемы площадного распределения МСС (проекции эпицентров МСС

на поверхность Земли) для всего энергетического спектра (см. рис. 5.1), слабых (0,2–0,3 кДж) МСС (см. рис. 5.2) и для 540 наиболее энергетически выраженных (0,8–1,0 кДж) МСС (см. рис. 5.3), построенные в пакете ArcGIS. Также приведены соответствующие картографические схемы плотности распространения МСС (рис. 5.1', 5.2' и 5.3'), рассчитанной на площадках 100×100 м (1 га). Анализ схем рис. 5 позволяет сделать следующие выводы:

- По всем трем вариантам построений видно асимметричное распространение МСС. Юго-западный сектор характеризуется большим числом МСС, чем северо-восточный.
- Из рис. 5.1 и 5.1' следует достаточно очевидный результат: наибольшее количество МСС

(N = 263) зафиксировано вблизи от группы СП (в 100 м к западу). Это обусловлено повышенной чувствительностью СП к близким МСС. Однако экстремум слабых (E = 0,2–0,3) событий (N = 263) расположен в 400 м к западу от группы СП (см. рис. 5.2 и 5.2').

- Для энергетически сильных событий (см. рис. 5.3 и 5.3') выделяются две основные зоны с наибольшим количеством МСС (N = 12 и 16), расположенные примерно в 600 м по направлениям на запад и юго-запад от группы СП. При этом непосредственно под озером Открытие зафиксировано очень мало МСС (N от 2 до 4).

При анализе рис. 5.3 и 5.3' видно, что эпицентр одной из двух экстремальных зон МСС находится в пределах южной части самого крупного озера, расположенного к западу от озера Открытие. Батиметрические исследования на этом озере показали его небольшую глубину (до 10 м), при этом кратеры или выходы газа не обнаружены. Очевидно, что оно менее активно по эмиссии газа, чем аномальное озеро Открытие, в котором глубина достигает 25 м и выявлен ряд кратеров. Объяснение этих различий было получено при объемном анализе всего куба данных МСС.

На рис. 6а представлено 3D изображение вертикальных распространений всех МСС по азимуту 325° с показанным положением двух сейсмических горизонтов «Г» и «M¹». Отметим, что данный азимут выбран не случайно, а по ориентации линии F, соединяющей зоны экстремальной плотности МСС на рис. 5.3' (показана пунктирной линией). Из рис. 6а видно, что значительная часть МСС (по расчетам — 25,4%, или 7299 МСС) расположена ниже горизонта «Г». МСС распределены внутри сферы диаметром 2 км с уменьшением их количества от центра к пе-

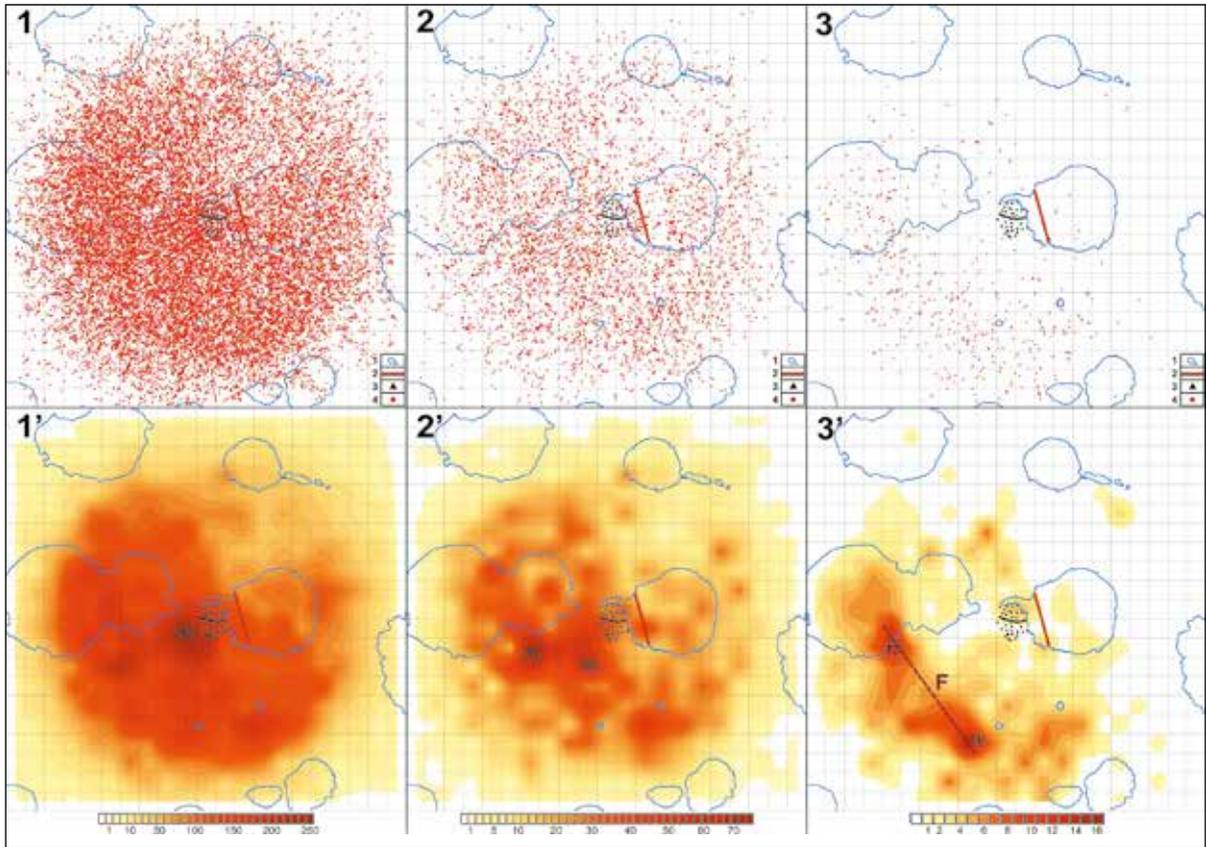


Рис. 5. Горизонтальное распространение эпицентров микросейсмических событий (МСС) на участке 2×2 км в районе озера Открытие и плотность их распределения по энергии: 1 и 1' – весь спектр (0,1–1,0), 2 и 2' – слабые (0,2–0,3), 3 и 3' – наиболее сильные (0,8–1,0). Обозначения: контуры озер (1), предполагаемый разлом (2), сейсмоприемники (3), МСС (4)
Fig. 5. Horizontal projection of microseismic event (MSE) epicenters over a 2×2 km site near Lake Otkrytiye and their distribution density by energies: 1 and 1' – the whole spectrum (0,1–1,0), 2 and 2' – weak (0,2–0,3), 3 and 3' – the strongest (0,8–1,0). Legend: contours of lakes (1), predicted fault (2), seismic receivers (3), MSE (4)

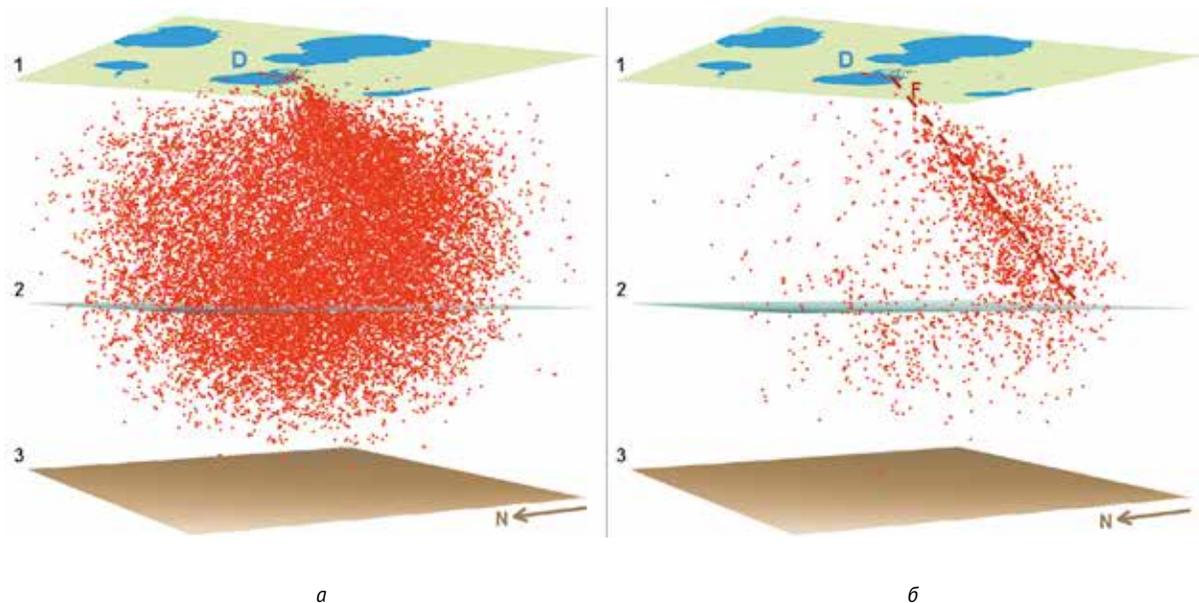


Рис. 6. Вертикальное распространение микросейсмических событий (МСС) в районе озера Открытие (D) для куба $2 \times 2 \times 2$ км: а – все ($E = 0,1–1,0$), б – сильные ($E = 0,6–1,0$). Обозначения: 1–3 – поверхности земли с термокарстовыми озерами (1) и сейсмических горизонтов «Г» (2) и «М¹» (3)
Fig. 6. Vertical distribution of microseismic events (MSE) near Lake Otkrytiye (D) for a $2 \times 2 \times 2$ km cube: а – all ($E = 0,1–1,0$), б – strong ($E = 0,6–1,0$). Legend: 1–3 – earth surface with thermokarst lakes (1) and seismic horizons “G” (2) and “M¹” (3)

риферии, что обусловлено чувствительностью сейсмоприемников. Других закономерностей нет, если не считать с трудом видимую ранее выявленную особенность распространения МСС — в юго-западной зоне их больше, чем в северо-восточной.

Устойчивые закономерности распространения наблюдаются при отдельном рассмотрении наиболее сильных МСС (А от 0,6 до 1,0). В качестве примера на рис. 6.2 отображено вертикальное распространение МСС с энергией 0,6—1,0 (всего 2468) по азимуту 325°. При этом видно, что МСС выше горизонта «Г» (их 1931, или 78,5% от 2468) большей частью относительно компактно сосредоточены рядом с центральной линией F (в объемном виде — с плоскостью F), ориентированной под углом 40° по отношению к вертикали. Особенно важно, что эта линия (плоскость) вблизи поверхности земли практически упирается в зону предполагаемого разлома на дне озера Открытие — D, прогнозируемого на основе данных дешифрирования ДЗЗ на месте четырех кратеров выбросов газа (см. рис. 6б). Это позволяет объяснить флюидопиток и накапливание газа вблизи дна озера Открытие, приводящие к периодическим мощным выбросам.

Обсуждение результатов

Мы интерпретируем полученный выше результат как свидетельство субвертикальной миграции пластовых флюидов из сеноманских отложений по разломной/трещиноватой зоне, которая схематично может быть аппроксимирована в двумерном вертикальном срезе по азимуту 325° (см. рис. 6б) линией F, а в трехмерном — плоскостью F. Отметим, что азимут простирания плоскости F близок к азимуту разлома (345°), прогнозируемого на основе дешифрирования данных ДЗЗ (линия через четыре кратера на рис. 2а). При среднем между ними азимуте 335° отклонения составляют всего 10°. Однако доверие к прогнозу по данным МСМ, сделанным на базе около 2 км, выше, чем визуально по линейному положению четырех кратеров на участке всего 180 м (см. рис. 2а).

Ориентация разлома (зоны трещиноватости) F СЗ-ЮВ по азимуту 325° согласуется региональным тектоническим строением, разлом параллелен Нурминскому мегавалу и согласуется с результатами изучения анизотропных свойств среды при кольцевом сейсмопрофилировании методом преломленных волн, полученными нами ранее совместно с МАГЭ ПГО «Севморгеология» в Карском море на Русановском месторождении [8]. Разлом F совпадает по направлению с обособленным от Западно-Сибирской рифтовой системы Ямальским рифтом (по разным данным азимут 318—330°, среднее значение — 324°) [22; 23]. Зона разлома близка к Ямальскому рифту или попадает на него. При этом вынуждены отметить, что сравнение положения Ямальского рифта по данным разных авторов [22; 23] показало его отклонения до 30 км от среднего.

В связи с полученными результатами авторы пришли к заключению, что выявленная около озера

Открытие зона (вблизи линии/плоскости F на рис. 5.3' и 6б) представляет собой разломную/трещиноватую зону с активной газогидродинамикой, обусловленной субвертикальной миграцией пластовых флюидов из отложений сеномана к поверхности земли. За счет непрерывного притока флюидов в придонные отложения озера Открытие формируются локальные АВПД, превышающие геостатические давления, в результате чего периодически происходит выброс газа или грязеводогазовой смеси с формированием гигантских (диаметром до 30—40 м, см. рис. 2б и 2в) кратеров.

Не исключено, что мощные выбросы газа на озере Открытие сопровождаются его самовоспламенением и взрывом, как это фиксировалось на всех объектах, включая Сеяхинский выброс С11, где были очевидцы извержений [1—6]. Ранее нами было показано, что самовоспламенения и взрывы газа с наибольшей вероятностью связаны с электростатическими разрядами [4].

Заключение

В результате геофизических исследований методом МСМ 4D в районе глубокого термокарстового озера Открытие выявлена активная газогидродинамическая зона, видимо, приуроченная к зоне субвертикального разлома (трещиноватости). Судя по закономерностям распределения МСС, существует миграция пластовых флюидов (в первую очередь газа) из верхнемеловых водогазонасыщенных отложений сеномана, в результате которой на дне озера Открытие периодически происходят мощные выбросы газа, приводящие к катастрофическим изменениям ландшафта. Судя по наблюдаемым на дне с помощью эхолокации и георадиолокации оползневым явлениям, из эруптивных каналов выбрасываются также фрагменты породы в мерзлом или талом виде.

Решаемые задачи по совершенствованию технологий МСМ 4D характеризуются высокой значимостью в связи с прямой ориентацией на разработку новых «технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения, а также предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», входящих в п. 19 и 21 «Перечня критических технологий Российской Федерации», утвержденного указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

Решение сложных задач выявления и мониторинга развития газозрывоопасных объектов и снижения угроз жизнедеятельности человека должно основываться на комплексном подходе с применением новых технологий детального изучения состояния геологической среды по данным ДЗЗ и наземных геофизических исследований, включая георадиолокацию, высокоразрешающую сейсморазведку МОГТ 2D-4D, пассивный МСМ 4D и др.

Авторы признательны Российской академии наук и Российскому фонду фундаментальных исследо-

ваний за поддержку научных и экспедиционных работ (грант РФФИ № 18-05-70106 «Разработка научно-технических основ и комплекса технических и программно-алгоритмических средств микросейсмического мониторинга процесса дегазации недр на суше и акваториях Крайнего Севера»), ПАО «НОВАТЭК», ОАО «Ямал СПГ» и лично Е. А. Коту за большую помощь в логистической поддержке экспедиционных работ.

Литература/References

1. *Богоявленский В. И.* Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Тр. Вольного экон. о-ва. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.
Bogoyavlensky V. I. Arktika i Mirovoi okean: sovremennoe sostoyanie, perspektivy i problemy osvoeniya resursov uglevodorodov. Monografiya. [Arctic and the World Ocean: current state, perspectives and challenges of hydrocarbon production. Monograph]. Tr. Vol'nogo ekon. o-va, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).
2. *Богоявленский В. И.* Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. — 2015. — № 6. — С. 4—10.
Bogoyavlensky V. I. Vybrosov gaza i nefi na sushe i akvatoriyakh Arktiki i Mirovogo okeana. [Oil and gas emissions on land and offshore areas of the Arctic and World oceans]. Burenie i nef', 2015, no. 6, pp. 4—10. (In Russian).
3. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В.* Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы России: Экономика и управление. — 2018. — № 2. — С. 60—70.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri poiske, razvedke i razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodov v Arktike. [Natural and technogenic threats in prospecting, exploration and development of hydrocarbon fields in the Arctic]. Miner. resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie, 2018, no. 2, pp. 60—70. (In Russian).
4. *Богоявленский В. И., Сизов О. С., Мажаров А. В. и др.* Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования катастрофического Сеяхинского выброса газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 1 (33). — С. 88—105. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105.
Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Mazharov A. V., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N., Kishankov A. V. Degazatsiya Zemli v Arktike: distantsionnye i ekspeditsionnye issledovaniya katastroficheskogo Seyakhinskogo vybrosov gaza na poluostrove Yamal. [Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of the Seyakha catastrophic gas blowout on the Yamal Peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 1 (33), pp. 88—105. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-88-105. (In Russian).
5. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. и др.* Дегазация Земли в Арктике: дистанционные и экспедиционные исследования выбросов газа на термокарстовых озерах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 31—47. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N., Nikonov R. A., Sizov O. S. Degazatsiya Zemli v Arktike distantsionnye i ekspeditsionnye issledovaniya vybrosov gaza na termokarstovykh ozerakh. [Earth degassing in the Arctic: remote and field studies of gas blowouts on thermokarst lakes]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 2 (34), pp. 31—47. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-31-47. (In Russian).
6. *Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В. и др.* Дегазация Земли в Арктике: комплексные исследования распространения бугров пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 52—68. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68.
Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Kargina T. N. Degazatsiya Zemli v Arktike: kompleksnye issledovaniya rasprostraneniya bugrov pucheniya i termokarstovykh ozer s kraterami vybrosov gaza na poluostrove Yamal. [Earth Degassing in the Arctic: Comprehensive Studies of the Distribution of Frost Mounds and Thermokarst Lakes with Gas Blowout Craters on the Yamal Peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2019, no. 4 (36), pp. 52—68. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-52-68. (In Russian).
6. *Bogoyavlensky V. I.* Innovative Technologies and Results of Studying Processes of Natural and Man-Made Degassing of the Earth in the Lithosphere-Cryosphere-Hydrosphere-Atmosphere System. Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas (Baku, 2019). 2019, 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.201952015.
8. *Богоявленский В. И., Урупов А. К., Будагова Т. А., Добрынин С. В.* Анизотропные свойства осадочного чехла континентального шельфа // Газовая пром-сть. — 1997. — № 7. — С. 16—18.
Bogoyavlensky V. I., Urupov A. K., Budagova T. F., Dobrynin S. V. Anizotropnye svoystva osadochnogo chekhla kontinental'nogo shel'fa. [Anisotropic properties of continental shelf sedimentary mantle]. Gazovaya prom-st', 1997, no. 7, pp. 16—18. (In Russian).
9. *Бугаев А. С., Дмитриевский А. Н., Ерохин Г. Н.* Технологии микросейсмического мониторинга в нефтегазовой отрасли // Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология 2018». Актуальные проблемы нефти и газа. — 2018. — Вып. 4 (23). — DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art76.
Bugaev A. S., Dmitriyevsky A. N., Erokhin G. N. Tekhnologii mikrosейсмического мониторинга в нефтегазовой отрасли // Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология 2018». Актуальные проблемы нефти и газа. — 2018. — Вып. 4 (23). — DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art76.
9. *Bugaev A. S., Dmitriyevsky A. N., Erokhin G. N.* Mikrosейсмический мониторинг в нефтегазовой отрасли. [Microseismic monitoring technologies in oil and gas industry]. Proceedings of international conference "Degassing of the Earth: geology and ecology 2018". Aktualniye

problemi nefti i gaza, 2018, no. 4 (23), DOI: 10.29222/irng.2078-5712.2018-23.art76. (In Russian).

10. Ерохин Г. Н., Бугаев А. С., Богоявленский И. В. Перспективы комплексирования нового метода сейсморазведки RTH и результатов пассивного микросейсмического мониторинга в решении задач выявления опасных объектов выбросов газа в Арктике // Бурение и нефть. — 2019. — № 7—8. — С. 52—57.

Erokhin G. N., Bugaev A. S., Bogoyavlenskiy I. V. Perspektivy kompleksirovaniya novogo metoda seysmorazvedki RTH i rezultatov passivnogo mikroseyzmicheskogo monitoringa v reshenii zadach viyavleniya opasnikh obyektov vybrosov gaza v Arktike. [Prospects of the RTH seismic exploration method and the results of passive microseismic monitoring integration in solving problems of identifying hazardous gas emissions in the Arctic]. Bureniye i neft, 2019, no. 7—8, pp. 52—57. (In Russian).

11. Erokhin G. N., Bortnikov P. B. Inverse problem of determination of the earthquake source seismic moment tensor. *Geology and Geophysics*, 1987, 4, pp. 115—123.

12. Ерохин Г. Н., Майнагашев С. М., Бортников П. Б. и др. Способ контроля процесса гидроразрыва пласта залежи углеводородов. Патент на изобретение RUS 2319177 19.06.2006.

Erokhin G. N., Maynagashev S. M., Bortnikov P. B., Kuzmenko A. P., Rodin S. V. Sposob kontrolya protsessa gidrorazryva plasta zalezhi uglevodorodov. Patent na izobretenie RUS 2319177 19.06.2006. [The method of hydrocarbon deposit fracking control. Invention patent RUS 2319177 19.06.2006]. (In Russian).

13. Erokhin G. N., Baranov V. D., Kremlev A. N., Smirnov I. I., Rodin S. V. Small microseismic surface acquisition system case study // 76th EAGE Conference and Exhibition, 2014, pp. 297—299, DOI: 10.3997/2214-4609.20140576.

14. Erokhin G., Kremlev A., Smirnov I., Rodin S., Baranov V. The optimal tight oil and shale gas development based on pre-existing fracture and principal stress models: Case study. SEG Technical Program Expanded Abstracts: 2014, pp. 2626—2630. Available at: <https://doi.org/10.1190/segam2014-1037.1>.

15. Ганеев Д. Н., Ерохин Г. Н., Родин С. В. и др. Новые возможности применения пассивного микросейсмического мониторинга для выявления структурно-тектонических особенностей участков нефтегазовых месторождений // Вестн. Балт. федер. ун-та им. И. Канта. Сер. Физ.-мат. и техн. науки. — 2014. — № 4. — С. 113—120.

Gapeyev D. N., Erokhin G. N., Rodin S. V., Sedaykin S. D., Smirnov I. I. Noviyе vozmozhnosti primeneniya passivnogo mikroseyzmicheskogo monitoring dlya viyavleniya strukturno-tektonicheskikh osobennostey uchastkov neftegazovykh mвstorozhdeniy. [New possibilities of passive microseismic monitoring use for detecting the structural and tectonic peculiarities of oil and gas fields parts]. Vestn. Balt. feder. un-ta im. I. Kanta. Ser. Fiz.-mat. i tekhn. nauki, 2014, no. 4, pp. 113—120. (In Russian).

16. Ганеев Д. Н., Ерохин Г. Н., Седайкин Р. Д., Строчков В. И. Опыт применения микросейсмического мониторинга для контроля заводнения на месторождении Северная Трува // Вестн. Балт. федер. ун-та им. И. Канта. Сер. Физ.-мат. и техн. науки. — 2015. — № 10. — С. 133—139.

Gapeyev D. N., Erokhin G. N., Sedaykin S. D., Strokov V. I. Opyt primeneniya passivnogo mikroseyzmicheskogo monitoringa dlya kontrolya zavodneniya na mestorozhdenii Severnaya Truva. [The case of passive microseismic monitoring use for water flooding control on the Severnaya Turva field]. Vestn. Balt. feder. un-ta im. I. Kanta. Ser. Fiz.-mat. i tekhn. nauki, 2015, no. 10, pp. 133—139. (In Russian).

17. Anokhina E., Zhegalina L., Erokhin G., Demidova E., Strokov V., Kozlov M. Possibilities of microseismic monitoring technology for control and optimization of hydrocarbon reservoir development the case of Eastern Kazakhstan oil fields. Society of Petroleum Engineers — SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2017.

18. Горбатилов А. В., Собисевич А. Л., Овсюченко А. Н. Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексурно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуго // Докл. Акад. наук. Геофизика. — 2008. — Т. 421, № 5. — С. 670—674.

Gorbatikov A. V., Sobisevich A. L., Ovsyuchenko A. N. Razvitiye modeli glubinnogo stroeniya Akhtyrskoy fleksurno-razryvnoy zony i gryazevoгo vulkana Shugo. [Development of the model of the deep structure of Akhtyr flexure-fracture zone and Shugo mud volcano]. Dokl. Akad. nauk. Geofizika, 2008, vol. 421, no. 5, pp. 670—674. (In Russian).

19. Duncan P., Laking J. Microseismic Monitoring with a Surface Array: Passive Seismic: Exploration and Monitoring Applications. EAGE Annual Conference & Exhibition, Dubai. Extended abstract, 2006, A29.

20. Турлов П. А., Кузнецов И. М. Современные бескабельные телеметрические сейсморегистрирующие системы (обзор) // Приборы и системы разведоч. геофизики. — 2014. — № 2. — С. 6—18.

Turlov P. A., Kuznetsov I. M. Sovremenniye beskabelniye telemetricheskiye seysmoregistriruyushchiye sistemy (obzor). [Modern no cable telemetric seismic registering systems (overview)]. Pribory i sistemy razvedoch. geofiziki, 2014, no. 2, pp. 6—18. (In Russian).

21. Никонов А. А. Крымские землетрясения 1927 года: неизвестные явления на море // Природа. — 2002. — № 9. — С. 13—20.

Nikonov A. A. Krymskiye zemletryaseniya 1927 goda: neizvestniye yavleniya na more [Earthquakes in Crimea in 1927: unknown phenomena in the sea]. Priroda, 2002, no. 9, pp. 13—20. (In Russian).

22. Гаврилов В. П., Федоровский Ю. Ф., Тронов Ю. А. и др. Геодинамика и нефтегазоносность Арктики / Под ред. В. П. Гаврилова. — М.: Недра, 1993. — 323 с.

Gavrilov V. P., Fedorovskiy Yu. F., Tronov Yu. A. et al. Geodinamika i neftegazonosnost Arktiki. [Geodynamics

and oil and gas potential of the Arctic]. Pod red. V. P. GavriloVA. Moscow, Nedra, 1993, 323 p. (In Russian).
23. Харахинов В. В. Нефтегазовая геодинамика Западно-Сибирского осадочного мегабассейна // Геология нефти и газа. — 2019. — № 2. — С. 5—21. — DOI: 10.31087/0016-7894-2019-2-5-21.

Kharakhinov V. V. Neftegazovaya geodinamika Zapadno-Sibirskogo osadochnogo megabasseyna. [Petroleum geodynamics of the West Siberian sedimentary megabasin]. Geologiya nefi i gaza, 2019, no. 2, pp. 5—21. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-2-5-21. (In Russian).

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), профессор, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: vib@pgc.su.

Ерохин Геннадий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, директор, НИИ прикладной информатики и математической геофизики, Балтийский федеральный университет им. И. Канта (236029, Калининград, Пролетарская ул., д. 131), e-mail: gerokhin@kantiana.ru.

Никонов Роман Александрович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), инженер, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), заведующий лабораторией, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Брыксин Виталий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер, НИИ прикладной информатики и математической геофизики, Балтийский федеральный университет им. И. Канта (236029, Калининград, Пролетарская ул., д. 131), e-mail: VBryksin@kantiana.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Ерохин Г. Н., Никонов Р. А. и др. Изучение зон катастрофических выбросов газа в Арктике на основе пассивного микросейсмического мониторинга (на примере озера Открытие) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 53—64. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-53-64.

STUDY OF CATASTROPHIC GAS BLOWOUT ZONES IN THE ARCTIC BASED ON PASSIVE MICROSEISMIC MONITORING (ON THE EXAMPLE OF LAKE OTKRYTIYE)

Bogoyavlensky V. I.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Erokhin G. N.

Research Institute of Applied Informatics and Mathematical Geophysics, Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad, Russian Federation)

Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Bryksin V. M.

Research Institute of Applied Informatics and Mathematical Geophysics, Immanuel Kant Baltic Federal University (Kaliningrad, Russian Federation)

The article was received on January 9, 2020

Abstract

For the first time, the technology of 4D passive microseismic monitoring (MSM) was used to study powerful gas blowout from the Earth's cryolithosphere in the Arctic. In the region of the deep thermokarst Lake Otkrytiye (Discovery), an active strong subvertical gas-hydrodynamic zone was revealed by MSM 4D. Based on the patterns of microseismic events distribution, the migration of formation fluids (primarily gas) was proved from the Cenomanian water-gas-saturated deposits of the Upper Cretaceous with powerful gas eruptions from the bottom of Lake Otkrytiye resulting in the formation of giant craters with a diameter of up to 30-40 m. The MSM 4D method contributes to solving the challenges of preventing and eliminating emergencies of a natural and man-made nature, and therefore belongs to the category of critical technologies.

Keywords: *Arctic, Yamal Peninsula, Lake Otkrytiye, gas-hydrodynamics, gas blowouts, volcanoes, craters, microseismic monitoring, 4D microseismic survey, remote sensing of the Earth.*

The authors are grateful to the Russian Academy of Sciences and the Russian Foundation for Basic Research for supporting scientific and field work (RFBR grant No. 18-05-70106 "Development of scientific and technical foundations and a set of technical and software-algorithmic means for microseismic monitoring of the process of subsoil degassing on land and in the waters of the Extreme North"); PJSC NOVATEK, OJSC Yamal LNG, and personally to E. A. Kot for considerable assistance in the logistical support of expeditionary work.

Information about the authors

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: vib@pgc.su.

Erokhin Gennadiy Nikolayevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director, Research Institute of Applied Informatics and Mathematical Geophysics, Immanuel Kant Baltic Federal University (131, Proletarskaya St., Kaliningrad, Russia, 236029), e-mail: gerokhin@kantiana.ru.

Nikonov Roman Aleksandrovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Engineer, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: nikonovroman@gmail.com.

Bogoyavlensky Igor Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Head of Laboratory, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Bryksin Vitaliy Mikhaylovich, PhD of Engineering Science, Associate Professor, Leading Engineer, Research Institute of Applied Informatics and Mathematical Geophysics, Immanuel Kant Baltic Federal University (131, Proletarskaya St., Kaliningrad, Russia, 236029), e-mail: VBryksin@kantiana.ru.

Bibliographic description

Bogoyavlensky V. I., Erokhin G. N., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Bryksin V. M. Study of catastrophic gas blowout zones in the Arctic based on passive microseismic monitoring (on the example of Lake Otkrytiye). *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 1 (37), pp. 53—64. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-53-64. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Erokhin G. N., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Bryksin V. M., 2020