

УДК 550.34

**ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМОИНФРАЗВУКОВОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ЗОНАХ АКТИВНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР КАРСКОГО ШЕЛЬФА И ЯМАЛА\***

**А.Н. Виноградов<sup>1,2</sup>, Ю.А. Виноградов<sup>2</sup>, А.А. Маловичко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Кольский научный центр Российской академии наук (КНЦ РАН), г. Апатиты

<sup>2</sup>Кольский филиал ГС РАН, г. Апатиты

<sup>3</sup>Геофизическая служба Российской академии наук (ГС РАН), г. Обнинск

**Аннотация**

Рассмотрены приоритетные задачи по развитию методов геофизического мониторинга потенциально опасных геодинамических процессов в литосфере и криосфере Западной Арктики. Показано, что существующий научный задел позволяет сформировать в Карско-Ямальском секторе инновационную региональную сеть геофизического мониторинга взрывных процессов, связанных с взрывной дегазацией недр или с техногенными факторами.

**Ключевые слова:**

*Западная Арктика, Ямал, Карско-Баренцевоморский шельф, промышленная безопасность, газогидраты, геофизический мониторинг, взрывные выбросы газа.*



В государственной Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года [1], в качестве одной из первоочередных мер предусмотрено создание системы комплексной безопасности для защиты территорий, населения и критически важных объектов АЗРФ от чрезвычайных ситуаций

природного и техногенного характера при разработке и реализации проектов освоения арктического континентального шельфа и прибрежной зоны, в том числе – развитие сетей дистанционного мониторинга геофизической обстановки с целью минимизации воздействия экстремальных геофизических процессов (естественного и искусственного происхождения) на среду обитания человека и транспортную инфраструктуру.

До начала XXI века было принято считать, что Арктический шельф относится к асейсмичным областям пассивной окраины Евразийской литосферной плиты, что в значительной мере оправдывало низкую плотность региональной сети сейсмического мониторинга: менее 15 опорных станций в континентальной части АЗРФ [2,3]. Однако, комплексные исследования в Баренцевоморско-Карской нефтегазовой провинции в последнее десятилетие выявили новую группу факторов риска для промышленной безопасности, связанную с неизвестными ранее особенностями строения и геодинамики криосферы, в частности, с деструкцией газогидратных залежей в верхнем горизонте осадочного чехла шельфа и аномальным айсберговым стоком с покровных ледников арктических архипелагов [4].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке совместного гранта РФФИ и Исследовательского совета Норвегии № 14-05-93080 Норв\_а «Взаимосвязь геофизических полей с сейсмичностью Евро-Арктического региона»

Низкоэнергетические волновые поля, генерируемые этими опасными процессами, по большей части не регистрируются действующими системами геофизического мониторинга.

До начала XXI века недостаток информации о слабой сейсмичности в Арктике не вызывал особой озабоченности, поскольку при строительстве на суше землетрясения с  $M < 4.5$  принято считать безопасными для большинства сооружений. При обустройстве морских промыслов на арктическом шельфе этот порог риска должен быть существенно понижен, потому что в ходе инженерно-геологических изысканий выяснилось, что даже слабые землетрясения (с  $M < 3$ ) могут провоцировать крупные оползни и сплывы слабых грунтов при уклонах рельефа дна в первые градусы. К примеру, у побережья Норвегии в зоне освоения газового месторождения Ормен Ланге выявлен оползень Сторегга, переместивший по склону шельфа около 20 миллиардов тонн литокластической горнопородной массы [5]. На площади Штокмановского газоконденсатного месторождения Баренцевом море был установлен оползень длиной около 30 км и мощностью более 12 метров, сошедший по тальвегу неглубокой депрессии с уклоном дна менее 5 градусов [6].

Опыт Норвегии по освоению шельфа Северного и Баренцевого морей показал, что на дне арктических акваторий, помимо тектонических землетрясений, существенную роль в создании опасных ситуаций играют флюидо-динамические процессы в осадочном чехле морского дна (грязевой вулканизм, разрушение газогидратных залежей и дегазация дна) и деструкция ледниковых покровов на арктических архипелагах (льдотрясения, отколы айсбергов, подводные оползни) [7]. Следовательно, при освоении шельфа АЗРФ для надежного обеспечения безопасности строящихся в море инженерно-технических сооружений необходимо сгущение и повышение чувствительности региональных сетей геофизического мониторинга геодинамического режима районов нефтегазодобычи и транспортных коридоров (в том числе трасс СМП) [3, 4, 8].

В России пока законодательно не определены требования к компаниям-операторам морских промыслов по профилактике геофизических рисков, хотя после гибели буровой платформы «Deerwater Hogizon» в Мексиканском заливе в 2010 году Экспертный совет по Арктике при председателе Совета Федерации РФ рекомендовал в комплексе мер по обеспечению государственной политики в АЗРФ «...закрепить законодательно обязательное включение в лицензионные соглашения на право разведки и освоения уникальных и крупных нефтегазовых месторождений в АЗРФ требования о применении сейсмомониторинговых технологий 4D–4C для надежного контроля и управления деформационными процессами в недрах и профилактики техногенных землетрясений с катастрофическими последствиями. Эта мера позволит избежать повторения на шельфе АЗРФ тяжелых аварий с гигантскими выбросами газа и нефти, подобных тем, что имели место на суше при освоении Тазовского, Бованенковского и Кумжинского газовых месторождений...» [9]. В 2012 г. обновленный и расширенный Экспертный совет по Арктике и Антарктике при председателе Совета Федерации вновь акцентировал внимание руководства страны и нефтегазового сектора на необходимости усиления мер по расширению сети сейсмологических станций и восстановления в стране собственной базы производства геофизического оборудования, освоения передовых технологий мониторинга состояния недр и опасных геологических процессов [10].

В 2010 г. экспертная группа РАН под руководством вице-президента РАН академика Н.П. Лаверова представила в правительственные органы ряд аналитических докладов, в которых обоснована необходимость включения в число приоритетных задач государства на 2013–2016 гг. создание по периметру Баренцевоморского бассейна сети геофизических обсерваторий для сейсмоинфразвукового мониторинга опасных динамических процессов в литосфере (землетрясения, грязевой вулканизм и оползневые явления на морском дне), криосфере (деструкция ледниковых шапок на арктических островах с проявлением мощных льдотрясений и сходом в акваторию моря крупных айсбергов) и атмосфере (вторжение болидов, падение фрагментов космических аппаратов и ракет) [11]. Оперативным практическим откликом на рекомендации РАН стало включение в федеральную целевую программу «Снижение рисков

и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года», утвержденную Правительством РФ 7 июля 2011 года, специального задания по формированию в 2013–2015 гг. Баренцевоморско-Карского сегмента системы геофизического мониторинга и комплексного контроля разномасштабных динамических явлений природного и техногенного генезиса в пределах подлежащих освоению нефтяных и газовых полей Арктической зоны. В утвержденной в 2009 году версии ФЦП №555 до 2015 г. было запланировано выделение 43 миллионов рублей на формирование береговой сети по периметру Баренцева моря, но фактически средства были выделены лишь в 2013 г. в объеме всего 1.425 млн рублей. По оценке ГС РАН, для создания и эффективного функционирования комплексной системы геофизического мониторинга природной среды в АЗРФ, что предусмотрено в п. 1.12 государственного Плана мероприятий по реализации Стратегии развития АЗРФ до 2020 года, необходимо выделить на фундаментальные и прикладные исследования не менее 139 млн рублей.

### **Потепление Арктики и активизация опасных процессов деструкции криосферы и газогидратных горизонтов морского дна**

К основным опасным геологическим процессам в зонах освоения Арктических шельфовых месторождений относятся [12]:

- землетрясения, приводящие к повреждениям нефтегазопромысловых сооружений, разрывам трубопроводов, деформациям скважин;
- обвалы, осыпи, оползни, сплывы, вызывающие механические повреждения сооружений, разрушение оснований, погребение инженерных сооружений на дне моря;
- геокриологические явления, связанные с промерзанием геологической среды и воздействием плавучих льдов, айсбергов, приводящие к повреждениям инженерных сооружений, деформации или разрушению морских платформ и искусственных островов;
- деградация газовых гидратов, просачивание газа из газоносных толщ, разложение органики, приводящие к разупрочнению илисто-глинистых оснований, переход песков в пльвунное состояние, аварийные ситуации при разведке и добыче газа.



*Рис. 1. Гигантский газовый пузырь, всплывший со дна моря  
вблизи добычной платформы в Северном море (по [7])*

Традиционно в фокусе внимания инженерной геологии находятся первые две группы факторов, и в гораздо меньшей степени изучены и явно недооценены угрозы для безопасности

промышленной инфраструктуры, создаваемые деструкционными процессами в криосфере, в первую очередь – в ледниковых покровах гористых архипелагов и в придонном слое газогидратов на арктическом шельфе. Между тем, опыт интернациональных морских исследований на западной окраине Баренцевоморского шельфа, в максимальной степени подвергающейся тепловому воздействию трансокеанического течения Гольфстрим, выявил за последние десять лет повсеместное распространение процессов флюидодинамики, с которыми связано возникновение огромных грязевых вулканов типа Хакон-Мосби, обширных полей и линейных структур со струйными выделениями метана со дна моря [7, 13–15], сопровождающихся местами мощными взрывными выбросами газовых пузырей до 250 метров в поперечнике (рис. 1).

На дне моря следы дегазации отражаются в виде многочисленных воронок и кратеров, окаймленных валами («брустверами») выброшенного грунта. Размер их в поперечнике варьирует от первых метров до 700 метров (рис. 2), глубины больших кратеров достигают 30–50 метров.

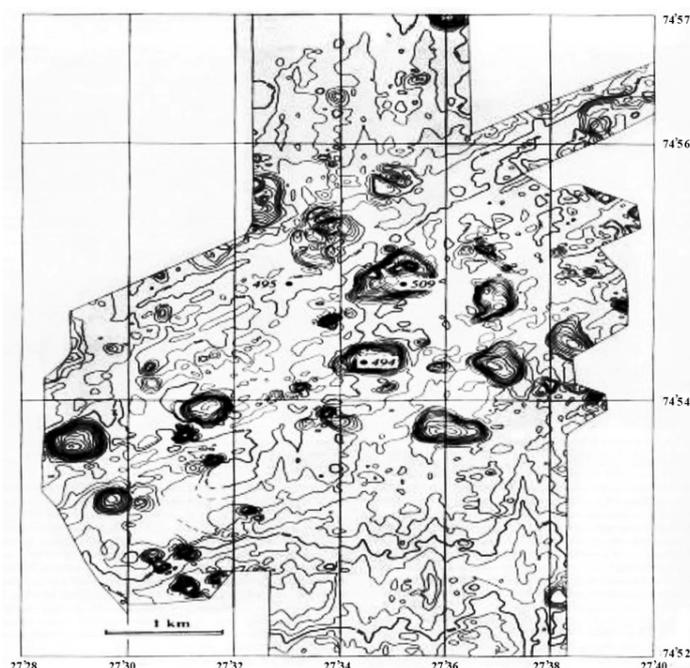


Рис. 2. Поле гигантских «покмарков» – взрывных воронок и кратеров на западной окраине Баренцевоморского шельфа (по [7])

Аналогичные по размерам и механизму формирования взрывные кратеры выявлены в 2013–2014 гг. на Ямале и побережье Карского моря и детально описаны в работах [16, 17]

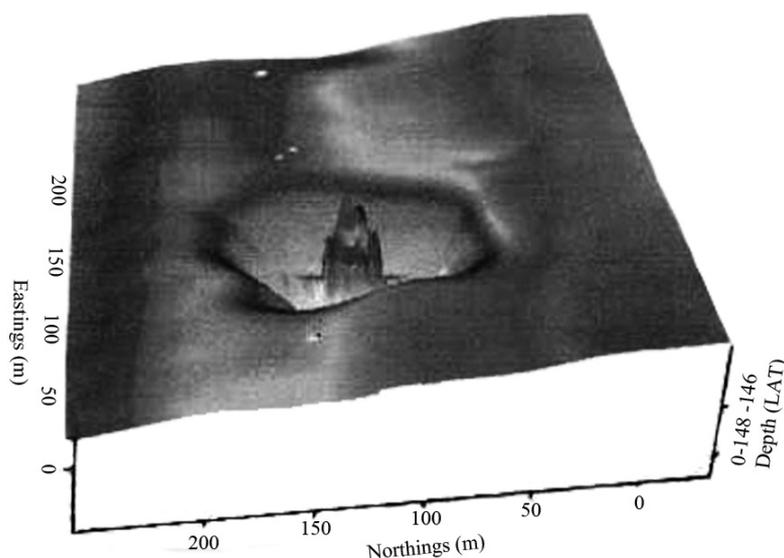
Концентрированные газовые выбросы («пузыри», «кипение моря») представляют собой прямую опасность не только для стационарных инженерных сооружений (остановка двигателей внутреннего сгорания, пожары), но и для транспортных судов – при попадании в газовый поток они теряют остойчивость и идут ко дну (рис. 4).

Дегазация морского дна в Карском море и Восточной Арктике изучена гораздо слабее, чем в Баренцевом море, однако и здесь давно известны проявления взрывных выбросов метана в районе Новосибирских островов, широкое развитие струйных потоков метана в море Лаптевых [18]. Совместные океанологические исследования Арктического университета Норвегии и ВНИИ «Океангеология им. И.С. Грамберга» в 2012 году в Байдарацкой губе (1300 км гидроакустических профилей вдоль побережья Ямала) показали, что на глубинах моря более 20 м под тонким слоем нелитифицированных осадков существует консолидированный слой вечной мерзлоты, служащий газопорным горизонтом, под которым формируются залежи

газогидратов. Масштабы их деструкции в настоящее время значительно больше, чем представлялось до сих пор, и сопоставимы с аналогичным процессом на окраине Баренцевоморского шельфа [19]. Данные хорошо коррелируют с материалами разведочного бурения на Бованенковской площади, где насыщенный газогидратами горизонт вечной мерзлоты залегает на глубинах 20–250 м [20].



*Рис. 3. Взрывной кратер в вечной мерзлоте на месте выброса газа в июле 2013 года вблизи пос. Бованенково на полуострове Ямал: диаметр 37 м, глубина 42 м, ширина полосы вывала ледово-породной массы до 120 м от брусвера (по [16, 17]).*



*Рис. 4. Норвежский траулер, затонувший в 1923 году в центре гигантского кратера, маркирующего взрывной выброс газа с глубины 148 метров (по [7]).*

Следует обратить особое внимание на различие в ведущих факторах стабильности малоглубинных и глубоководных тел газогидратов. В Арктике малоглубинные тела газогидратов находятся в слое вечной мерзлоты в диапазоне температур от 0 до -10 °С при давлении от 1 до 25 бар. Как хорошо видно по фазовой диаграмме системы «вода–лед–газ–газогидрат» (рис. 5), при таких параметрах среды устойчивость газогидратов на линии равновесия *ihg* исключительно сильно зависит от вариаций давления – уменьшение его на 1-2 бара может спровоцировать самопроизвольное разложение газогидратов, при котором каждый кубометр «конденсированной» фазы будет продуцировать до 160 кубометров газа.

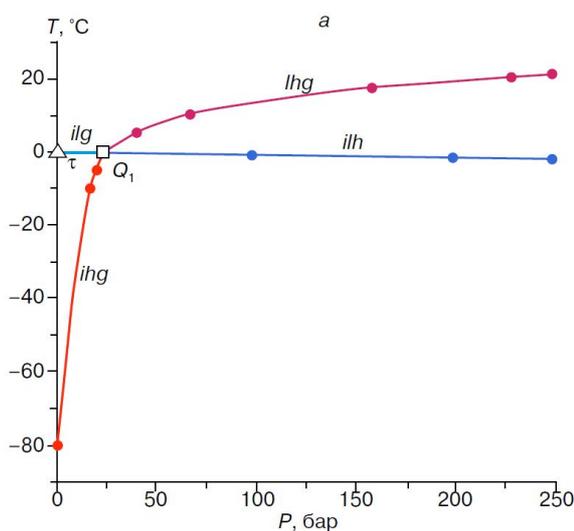


Рис. 5. Фазовая диаграмма системы «вода (l)-лед (i)-метан (g)-газогидрат (h), по [21]

С учетом этой особенности можно прогнозировать, что мелководные участки на границе речных дельт и морских заливов, на которых стабильность горизонта газогидратов в мерзлоте контролируется субвертикальным участком линии фазового равновесия *ihg*, с точки зрения промышленной безопасности следует относить к территориям с высокими рисками взрывоопасности. Здесь любое механическое воздействие на донный покров (миграция русла реки или подводного течения, прокладка судоходного канала через мелководный бар, углубление дна у портовых причалов и т.п.), приводящее к снижению статической нагрузки на близповерхностные тела газогидратов, может спровоцировать их саморазложение. Поскольку мерзлые породы обладают низкой газопроницаемостью, выделяющийся из газогидратов свободный газ будет формировать скопления с аномально повышенным пластовым давлением. При превышении предела прочности произойдут взрывные выбросы с формированием крупных кратеров на дне и гигантских пузырей метана в водной толще (см. рис. 1, 2). Взрывные процессы повышают сейсмичность дна, что в свою очередь ускоряет механическую деструкцию газогидратов даже в поле их термодинамической стабильности. При проявлении сильных сейсмических событий (соизмеримых по энерговыделению с ядерными взрывами) массовая деструкция газогидратов в донных осадках иногда приводит к возникновению на шельфе долгоживущих флюидодинамических систем, подобных гейзерным областям. В таких участках устанавливается специфический геодинамический режим с регулярной периодичностью слабых землетрясений [22, 23], а акватории над очаговой зоной землетрясений резко теряют рыбопродуктивность вследствие миграции рыбного населения за пределы области сейсмостресса [24].

На больших глубинах (при давлении более 30 бар и температуре выше 0 °С) стабильность газогидратов контролируется, главным образом, температурой (на рис. 5 критическая линия фазового равновесия *lhg* субпараллельна оси давления), и именно этим обстоятельством определяется медленная деструкция газогидратов при потеплении климата и плавном смещении

критической изотермы в глубину разреза осадочного покрова морского дна. В дельтах могучих сибирских рек этот плавный вековой ход дегазации может нарушаться в особо жаркие годы вследствие прогрева донных осадков аномально теплыми водами речного стока. Из-за малой скорости кондуктивного теплопереноса в рыхлых осадках тепловой поток достигнет слоя газогидратов со сдвигом в несколько месяцев, поэтому максимум дегазации может приходиться на осенне-зимний период, когда акватория покрывается льдом. В этом случае потоки метана из деградирующих тел газогидратов лишены возможности свободного прохождения сквозь толщу вод в атмосферу, будет происходить аномальная концентрация метана в воде, что может спровоцировать заморы рыбы над ареалами повышенной дегазации, поскольку метан губителен для рыбного населения водоемов [22].

### **Сейсмоинфразвуковой мониторинг природной среды – инновационная технология для Арктической зоны России**

Многолетний опыт интернационального мониторинга сейсмических событий естественного и техногенного генезиса в Западной Арктике, осуществляемый Кольским филиалом Геофизической службы РАН в кооперации с Норвежским геоинформационным центром NORSAR, показал, что надежная регистрация и классификация слабых землетрясений и низкоэнергетических событий взрывного характера на арктическом шельфе на удаленностях до 1000 км возможна только при помощи интегрированных сейсмоинфразвуковых групп [2, 3].

Применение интегрированной сейсмоинфразвуковой станции в системах комплексного мониторинга состояния природной среды повышает надежность контроля геодинамического режима территории, обеспечивая выявление и локацию тектонических и техногенных землетрясений, наземных и подводных взрывов, обрушений краев ледников с образованием крупных айсбергов, представляющих опасность для мореплавания. Такие комплексы можно эффективно использовать для автоматического контроля соблюдения регламентируемых режимов в охранных зонах вокруг инженерно-технических сооружений повышенной опасности (в том числе подземных и наземных хранилищ нефти и газа), обеспечивая обнаружение случаев и мест проведения несанкционированных наземных взрывов и предотвращая ложное срабатывание охранных систем на ударно-волновые процессы в атмосфере. Регистрация инфразвуковых волн также может быть полезна для обнаружения прорывов газопроводов и утечек газа из них, выявления опасных для навигации в арктических морях зон аномальной флюидной разгрузки и связанного с ними подводного грязевого вулканизма на трассах Северного морского пути и в акватории Обской губы.

### **Оптимальный тип сейсмоинфразвуковых станций для условий ЯНАО**

В данном разделе приводится описание типовой сейсмоинфразвуковой станции, рекомендуемой для размещения на побережье Карского моря и на полуострове Ямал для дистанционного контроля проявления слабой сейсмичности, сопровождающейся взрывными выбросами газа, а также техногенных взрывов.

Станция состоит из широкополосного трехкомпонентного сейсмометра и трех инфразвуковых микробарографов.

Для установки сейсмометра изготавливается сейсмопункт, представляющий из себя бункер глубиной 3–3.5 метра, шириной 2.5 метра и длиной 4–5 метров. Сейсмометр размещается на изолированном бетонном постаменте размером 1 × 1.5 × 1 метр, заглубленного на глубину 3 метра ниже уровня земной поверхности. Доступ в бункер осуществляется через люк размером 1.2 × 1.2 метра по лестнице-стремянке. Для защиты входа от внешних воздействий над ним устанавливается деревянный павильон с входной дверью. В бункере размещается широкополосный трехкомпонентный сейсмометр GURALP-3ESPC, цифровой регистратор, спутниковый модем, аппаратура обеспечения бесперебойного питания. Снаружи павильона устанавливается спутниковая антенна для передачи данных и технологической связи VSAT.

Инфразвуковая малоапертурная группа (рис. 6) формируется из трех микробарографов, помещенных в герметичные кожухи, заглубленные на всю свою высоту в почвенный слой на расстоянии 200–220 метров от центрального бункера, с которым они соединяются коммутационным кабелем; для уменьшения влияния ветровой помехи каждый микробарограф оснащен системой пространственных фильтров, представляющих из себя многолучевую систему пластиковых труб диаметром 12–15 мм. Аналоговый сигнал от каждого микробарографа по кабельным линиям поступает в центральный бункер, где расположен сейсмометр, АЦП для преобразования сигналов в цифровой вид, блок резервного питания, буферный накопитель для хранения данных и модем спутниковой связи для их передачи в центр обработки.

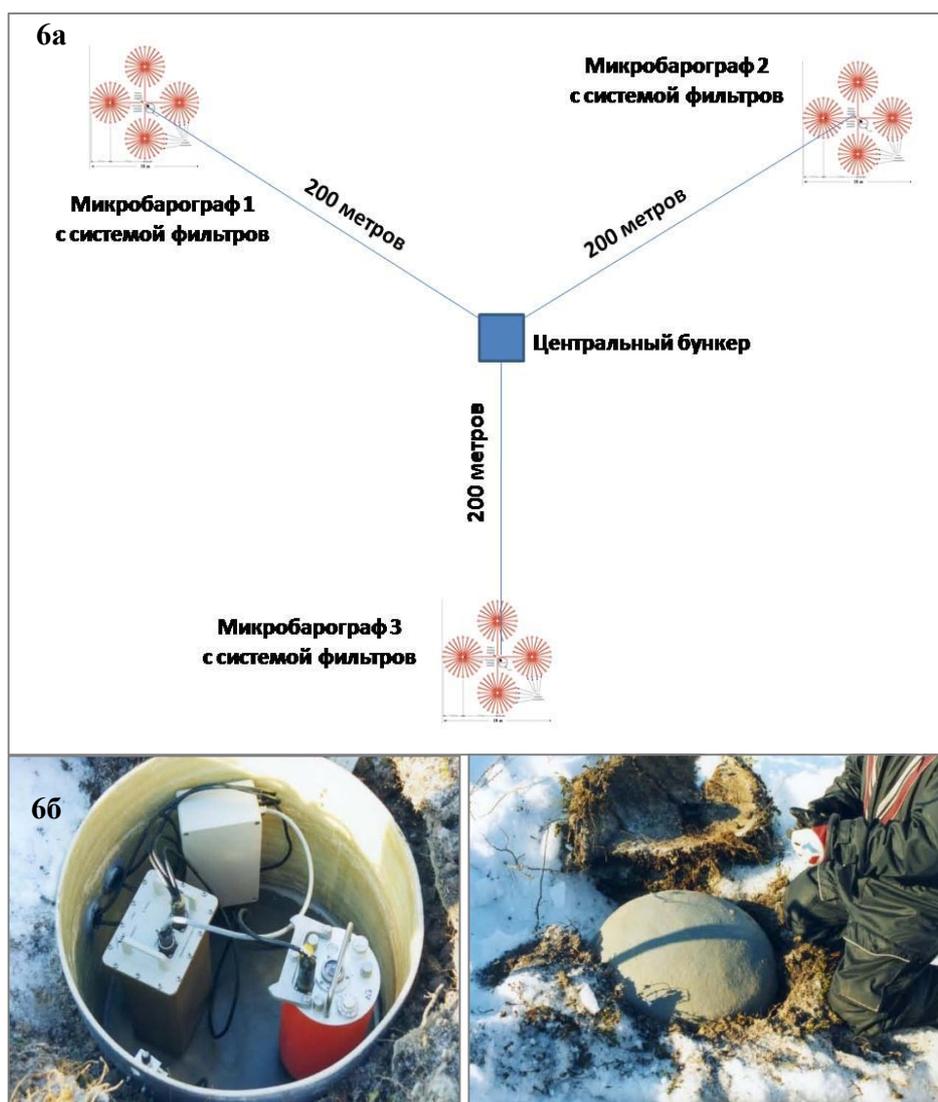


Рис. 6. Структура инфразвуковой группы сейсмоинфразвуковой станции:  
6а – конфигурация в плане; 6б – обустройство герметичных контейнеров для микробарографов

Предлагаемая конфигурация опорных станций обеспечивает накопление и хранение непрерывно поступающей информации на внешних носителях, а также дистанционный доступ в режиме реального времени для оперативной регистрации, оценки и локализации сейсмических событий в нефтегазовых полях шельфа Карского моря и газоносных полей Ямала. Для долговременного хранения базы данных и детальной обработки сейсмологической информации все данные сейсмометров должны по спутниковому каналу передаваться в единый

Центр обработки (Апатиты или Обнинск), где будет осуществляться анализ волновых форм для классификации событий и точного определения их координат и магнитуды.

Совместный интегральный анализ сейсмических и инфразвуковых данных дает возможность осуществлять верификацию источника возбуждения энергии, производить его локацию и оценивать интенсивность. Объединение сейсмического и инфразвукового методов регистрации волновых полей в единый комплекс позволяет достоверно разделять наземные и подземные взрывы, а также отличать происходящие в литосфере и гидросфере события от различных ударно-взрывных возмущений, генерирующих инфразвуковые волны в нижних и верхних слоях атмосферы [25].

### Заключение

В связи с расширением масштабов газодобычи на Ямале и подготовкой к освоению углеводородных полей Карского шельфа и строительству порта Сабетта целесообразно приступить к формированию в ЯНАО сети сейсмомониторинга для выявления зон с повышенным уровнем проявления опасных деструктивных процессов и обеспечения непрерывного контроля геодинамического режима в зонах промышленного освоения. Это позволит локализовать участки повышенного риска на шельфе, ассоциированные с полями взрывных выбросов газов и грязевого вулканизма, а также обеспечит раннее оповещение о сходе крупных айсбергов на трассы СМП, пролегающие вблизи архипелагов Новой и Северной Земли. На начальном этапе следует разместить на Ямале, как минимум, четыре сейсмоинфразвуковые станции: на острове Белом, у порта Сабетта и у поселков Харасавей и Бованенково (рис. 8). Для контроля геодинамического режима дна в Байдарачской губе, через которую пройдет магистральный газопровод, требуется восстановить высокочувствительную сейсмогруппу ГС РАН в Амдерме, размещавшуюся в подземных выработках выведенной из эксплуатации флюоритовой шахты [2]. Обсерватория действовала в 1993–2004 гг. и была закрыта из-за технических проблем с обеспечением энергией.

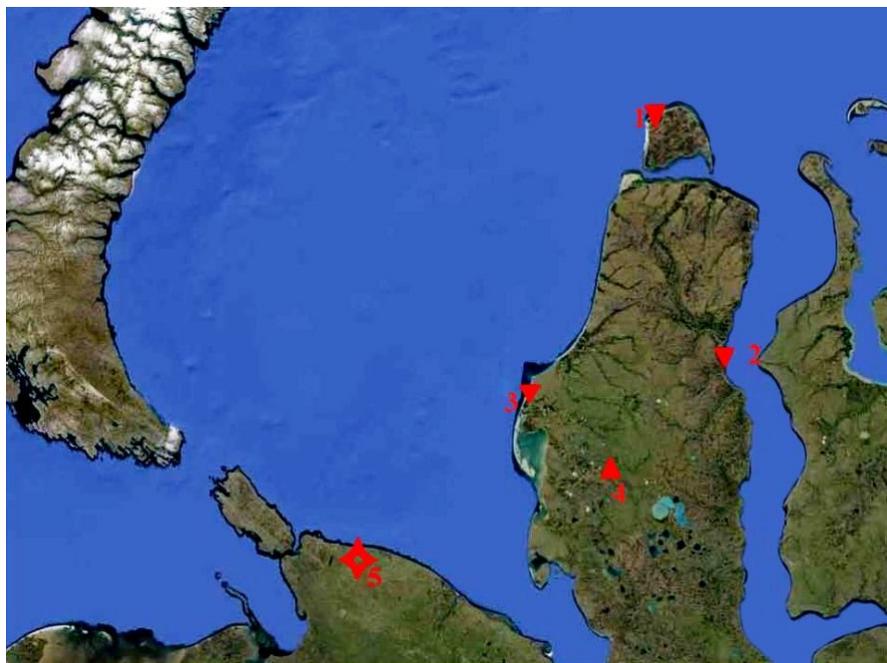


Рис. 8. Конфигурация первоочередной сети сейсмоинфразвуковых станций на Ямале:  
1 – о.Белый, 2 – Сабетта, 3 – Харасавей, 4 – Бованенково, 5 – Амдерма

Опытная эксплуатации этой первоначальной сети сейсмоинфразвукового мониторинга геодинамического режима недр позволит уточнить диапазон и чувствительность опорных

сейсмоинфразвуковых групп, с помощью которых можно будет на следующем этапе развития системы мониторинга Карско-Ямального сектора сформировать региональную сеть, адекватную Баренцовоморской сети, создаваемой в настоящее время в рамках Федеральной целевой программы № 44.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года // Арктические ведомости. 2013. №1(5). С. 162–82.
2. Формирование системы сейсмологического и инфразвукового мониторинга в Западной Арктике в XX веке и перспективы ее дальнейшего развития / А.Н. Виноградов, Ю.А. Виноградов, Е.О. Кременецкая, С.И. Петров // Вестник Кольского научного центра. 2012. № 4. С. 145–163.
3. Развитие систем геофизического мониторинга в Арктике / А.А. Маловичко, А.Н. Виноградов, Ю.А. Виноградов // Арктика: экология и экономика. 2014. №2 (14). С. 16–23.
4. Маловичко А.А., А.Н. Виноградов, Ю.А. Виноградов Государственная стратегия освоения Арктической зоны России и задачи ГС РАН по развитию систем геофизического мониторинга в Арктике // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы IX Международной сейсмологической школы, Республика Армения, 8–12 сентября 2014 г. Обнинск: Изд. ГС РАН, 2014. С. 3–11.
5. The Storegga Slide: Architecture, geometry and slide development / H. Hafliðason, H.P. Sejrup, A. Nygard et al. // Marine Geology. 2004. Vol. 213. P. 201–234.
6. Крапивнер Р.Б. О неотектонической активности и сейсмичности Баренцовоморского шельфа // Материалы международной конференции «Нефть и газ Арктического шельфа 2006». Мурманск: Изд. ЗАО «Арктикшельф», 2006. (электронная публикация на CD).
7. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow. The impact on geology, biology, and the marine environment. Cambridge University Press. 2007. 476 p.
8. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л. Задачи научного обеспечения морской деятельности в зоне Северного морского пути // Арктика: экология и экономика, 2014. №1 (13). С. 48–56.
9. О состоянии и проблемах в законодательном обеспечении реализации Основ государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу: ежегодный доклад. 2010. М.: Изд. Совета Федерации, 2011. 80 с.
10. Иванов Г.В. Деятельность Экспертного совета по Арктике и Антарктике при председателе Совета Федерации в 2012 г. // Арктика: экология и экономика. 2013. №1 (9). С. 100–106.
11. Лаверов Н.П. О вкладе Российской академии наук в современное освоение и развитие Арктики // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 4–9.
12. Мельников Н.Н., Калашник А.И. Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2009. 140 с.
13. Ferré B., Mienert J., Feseker T. Ocean temperature variability for the past 60 years on the Norwegian-Svalbard margin influences gas hydrate stability on human time scales // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. C10017. Pp. 1–14. Doi:10.1029/2012jc008300.
14. Methane release from warming induced hydrate dissociation in the West Svalbard continental margin: Timing, rates, and geological controls / K.E. Thatcher, G.K. Westbrook, S. Sarkar, T.A. Minshull // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. Vol. 118. Pp. 22–38. Doi:10.1029/2012JB009605.
15. Vadakkepulyambatta S., Bünz S., Mienert J., Chand S. Distribution of subsurface fluid flow systems in the SW Barents Sea // Marine and Petroleum Geology. 2013. Vol. 43. Pp. 208–221.
16. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 1 // Бурение и нефть. 2014. № 9. С. 13–18.
17. Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Часть 2. // Бурение и нефть. 2014. № 10. С. 1–10.
18. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf / N. Shakhova, I. Semiletov, A. Salyuk et al. // Science. 2010. Vol. 327. P. 1246–1250.
19. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths > 20 m at the South Kara Sea shelf / A. Portnov, A.J. Smith, J. Mienert, G. Cherkashov, P. Rekant, P. Semenov, P. Serov, D. Vanshtein // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40, Issue 15. Pp. 3962–3967. DOI: 10.1002/grl.50735.
20. Строение и свойства пород криолитозоны Южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения / Е.М. Чувиллин, Е.В. Перлова, Ю.Б. Баранов, В.В. Кондаков, А.Б. Осокин, В.С. Якушев. М., ГЕОС, 2007. 137 с.
21. Дядин Ю.А., Гушин А.Л. Газовые гидраты // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 3. С. 55–64.
22. Баранов С.В. Афтершоковый процесс землетрясения 21.02.2008 г. в проливе Стур-Фиорд (архипелаг Шпицберген) // Вулканология и сейсмология. 2013. № 3. С. 1–15.
23. Баранов С.В., Виноградов А.Н. Возможные причины аномальной сейсмической активности в проливе Стурфиорд (архипелаг Шпицберген) в 2008–2009 годах // Вестник С.Петербург. ун-та. Сер. 7. 2010. Вып. 4. С. 23–31.
24. Влияние сейсмичности на распределение рыбных скоплений на западной окраине Баренцовоморского бассейна / А. Виноградов, С. Баранов, А. Жичкин, Д. Моисеев // Рыбные ресурсы. 2011. № 2. С. 18–21.
25. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / под ред. В.В. Адушкина и А.А. Маловичко. М.: ГЕОС, 2013. 384 с.

#### Сведения об авторах

*Виноградов Анатолий Николаевич* – к.г.м.н., главный ученый секретарь КНЦ РАН; директор Кольского филиала Геофизической службы РАН; e-mail: vino@admksk.apatity.ru

*Виноградов Юрий Анатольевич* – к.т.н., зам. директора Кольского филиала Геофизической службы РАН; e-mail: vin@krsc.ru

*Маловичко Алексей Александрович* – д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Геофизической службы РАН; e-mail: amal@gstras.ru