

Развитие систем геофизического мониторинга в Арктике

А. А. Маловичко¹, член-корреспондент РАН
Геофизическая служба РАН, Обнинск

А. Н. Виноградов², кандидат геолого-минералогических наук
Кольский научный центр РАН, Апатиты

Ю. А. Виноградов³, кандидат технических наук
Кольский филиал Геофизической службы РАН, Апатиты

Рассмотрены современное состояние и перспективы развития в западной Арктике региональной системы сейсмоинфразвукового мониторинга геодинамических процессов в литосфере и криосфере, создающих угрозу промышленной безопасности в зонах освоения нефтегазовых ресурсов и на морских коммуникациях.

Ключевые слова: западная Арктика, безопасность морехозяйственной деятельности, арктический шельф, водные ледники, айсбергообразование, сейсмичность, система сейсмоинфразвукового мониторинга.

Введение

Открытие на грани веков гигантских нефтегазовых ресурсов на шельфе арктических морей и перспектива превращения Северного морского пути в эпоху аномального потепления в общедоступный кратчайший морской коридор между европейскими и азиатско-тихоокеанскими центрами глобального рынка вернули Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) внимание государства и бизнеса. 20 февраля 2013 г. президент России утвердил «Стратегию развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» [2], а в октябре того же года Правительство РФ приняло план приоритетных мероприятий по ее реализации. В обоих программных документах в качестве первоочередных мер предусмотрено создание системы комплексной безопасности, в частности, развитие сети мониторинга геофизической обстановки с целью минимизации воздействия экстремальных геофизических процессов естественного и искусственного происхождения на среду обитания человека, транспортную инфраструктуру и критически важные инженерно-технические объекты в Арктической зоне. В перечень пионерных объектов для промышленного освоения включены

месторождения углеводородов на континентальном шельфе Баренцева, Печорского и Карского морей, полуостровов Ямал и Гыдан.

По сложившейся с середины XX в. практике ведущую роль в организации мониторинга геофизической среды играют исследовательские институты и обсерватории Российской академии наук, в поле зрения которых находятся все аспекты вариаций волновых полей в магнитосфере, ионосфере, атмосфере, гидросфере и земной коре, от которых зависит планирование мероприятий по противодействию негативным эффектам, возникающим при отклонении от «нормы» «космической погоды» или геодинамического режима недр. К последнему из упомянутых риск-факторов в настоящее время проявляется пристальное внимание, особенно в регионах, через которые проходят пояса повышенной сейсмичности и где регулярно повторяются землетрясения разрушительной силы. Арктическую зону Российской Федерации (АЗРФ) не относят к такого рода территориям, более того, принято считать, что большая ее часть представлена так называемыми «асейсмичными областями», в которых землетрясений магнитудой (M) более 4,5 практически не зафиксировано за весь период инструментальных наблюдений (рис. 1).

Это «научное наследие» прошлого века очень устраивало инженеров-строителей, призванных в наше время проектировать техническое обустройство

¹ e-mail: amal@gsras.ru.

² e-mail: vino@admksk.apatity.ru.

³ e-mail: vin@krsc.ru.

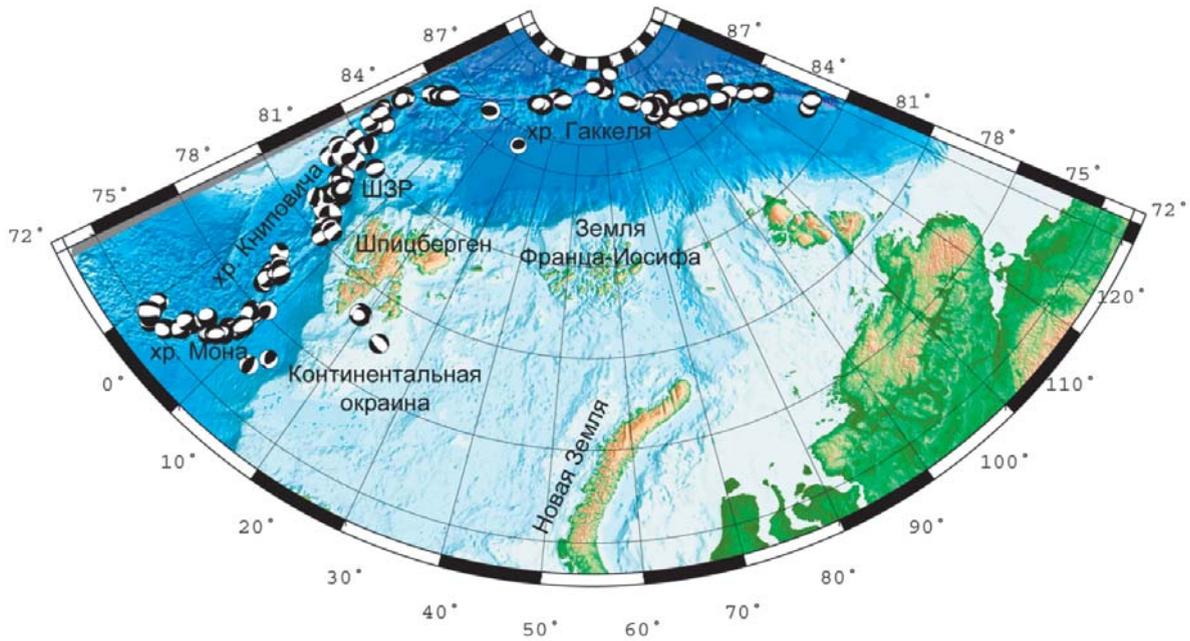


Рис. 1. Пространственное распределение в Арктике очагов землетрясений M более 4,5 по данным мировой и российской сети сейсмического мониторинга за период цифровой регистрации в 1977–2011 гг. (по [21])

арктических промышленных зон: «асейсмичность» дает осваиваемым территориям определенные конкурентные преимущества, поскольку по действующим правилам здесь не требуется предусматривать специальные меры по обеспечению сейсмостойкости зданий и инженерных сооружений. Такой подход к оценке сейсмического риска был достаточно оправдан при освоении континентальных районов российского Заполярья, но правомерность распространения накопленного опыта на арктический шельф вызывает серьезные сомнения и опасения в связи с недостатком знаний о геомеханических параметрах породных формаций, слагающих дно арктических морей. К этому следует добавить, что общепризнанное представление об асейсмичности нефтегазовых провинций на арктическом шельфе предстоит перепроверить и доказать, поскольку оно основано на данных сильно разреженной сети сейсмостанций, удаленных на сотни и тысячи километров от подлежащих освоению площадей.

Современное состояние сети сейсмомониторинга в Арктической зоне Российской Федерации

Мониторинг сейсмичности в России осуществляет Геофизическая служба Российской академии наук (ГС РАН), которая располагает всего 50 цифровыми сейсмостанциями севернее параллели 55° с. ш. (рис. 2). Столь редкая сеть позволяет регистрировать на шельфе АЗРФ и в Северном Ледовитом океане только относительно сильные землетрясения магнитудой выше 4,5, приуроченные к Срединно-Арктическому поясу повышенной сейсмической активности.

До начала XXI в. недостаток информации о слабой сейсмичности в Арктике не вызывал особой озабоченности, поскольку при строительстве на суше землетрясения с M менее 4,5 принято считать безопасными для большинства сооружений. При обустройстве морских промыслов на арктическом шельфе этот порог риска должен быть существенно понижен, поскольку в ходе инженерно-геологических изысканий выяснилось, что даже слабые землетрясения (с M менее 3) могут провоцировать крупные оползни и сплывы слабых грунтов при уклонах рельефа дна в первые градусы. Например, у побережья Норвегии в зоне освоения газового месторождения Ормен Ланге выявлен оползень Сторегга, переместивший 8200 лет назад по склону шельфа около 20 трлн т литокластической горнопородной массы [16]. На площади Штокмановского месторождения был установлен оползень длиной около 30 км и мощностью более 12 м, сошедший по тальвегу неглубокой депрессии с уклоном дна менее 5° [12]. Следовательно, возникает практическая потребность в гущении и повышении чувствительности региональных мониторинговых сетей, обеспечивающих контроль слабой сейсмичности в зонах морской добычи углеводородов.

Первой страной, добившейся снижения порога регистрации землетрясений до M , равной 3, в осваиваемых зонах Норвежского и Баренцева морей, стала Норвегия. Благодаря усилиям исследовательского центра НОРСАР, действовавшего в кооперации с ГС РАН и сейсмологическими службами Финляндии и Польши, была получена принципиально новая картина сейсмической активности баренцевоморского шельфа и Северной Атлантики

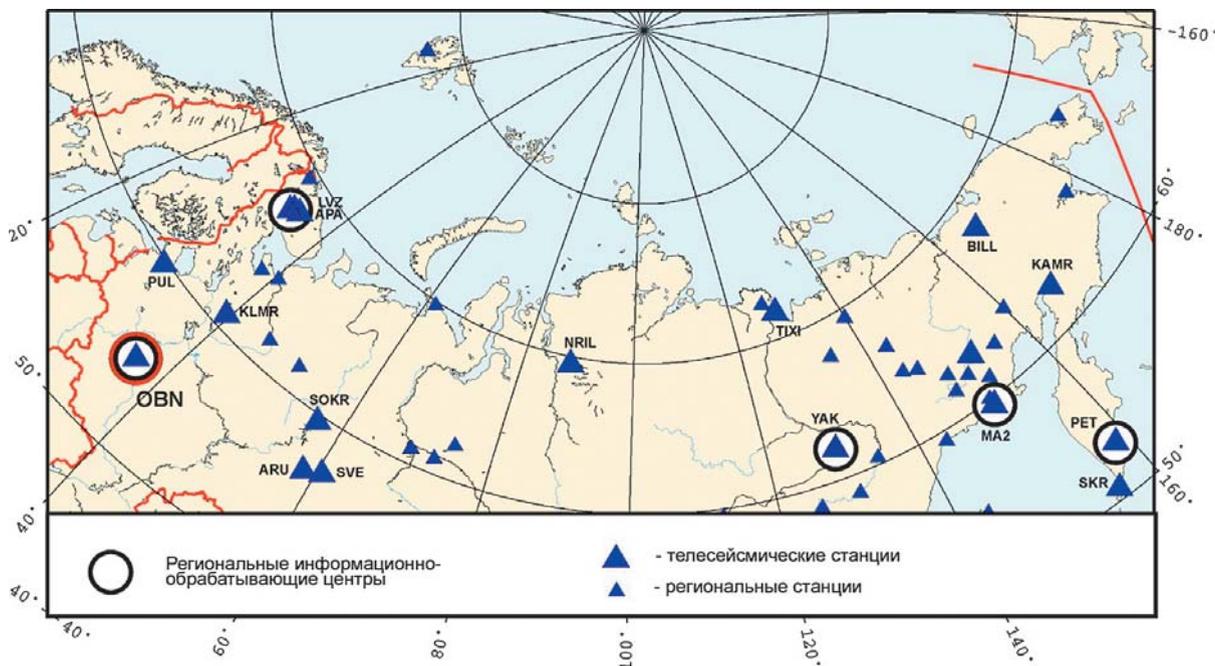


Рис. 2. Сеть опорных сейсмостанций Геофизической службы РАН, обеспечивающая мониторинг землетрясений и взрывов в Арктической зоне Российской Федерации

(рис. 3): наряду с Северо-Атлантическим поясом сильных тектонических землетрясений (аналогичным Срединно-Арктическому поясу) выявились очаговые ареалы слабой сейсмичности, обусловленной флюидо-динамическими процессами в осадочном чехле шельфа (грязевой вулканизм и дегазация дна) и деструкцией ледниковых покровов на арктических архипелагах (льдотрясения и отколы айсбергов).

Переоценка сейсмической опасности на шельфе западной Арктики

Обновленная база данных о сейсмической активности баренцевоморского шельфа послужила основанием для пересмотра традиционного набора геодинамических риск-факторов, создающих потенциальные угрозы при развитии офшорных нефтегазовых промыслов на арктическом шельфе [15]. Было обращено внимание на то обстоятельство, что геомеханическая среда шельфа создает предпосылки для гораздо большей амплитуды просядок кровли нефтегазовых месторождений по сравнению с континентальными районами газодобычи. Эта особенность, в свою очередь, увеличивает вероятность проявления при эксплуатации офшорных промыслов техногенно-индуцированных землетрясений, способных вызвать серьезные повреждения инженерных систем. Примером такого негативного сценария эволюции природно-технической системы может служить месторождение Экофиск в Северном море, при отработке которого к 30-му году мульда проседания превысила 8 м, и под ней на глубине 1,5—3 км возник очаг землетрясения $M_w = 4,1—4,4$, вызвавшего интенсивное сотрясение добычных платформ [18].

С учетом норвежского опыта и новых моделей [15] были переоценены возможные масштабы сейсмической опасности при отработке Штокмановского газоконденсатного месторождения-гиганта на шельфе Баренцева моря и показано, что уже через 10 лет при добыче газа на уровне 71 млрд m^3 в год вследствие формирования мульды проседания глубиной более 15 м может произойти землетрясение магнитудой более 5,7, что спровоцирует сотрясение поверхности дна в местах размещения подводных добычных комплексов до 11 баллов по шкале МСК-64. Не исключено, что столь мощный толчок на морском дне спровоцирует волну цунами, способную достичь Мурманского побережья и оказать разрушительное воздействие на инженерные сооружения по берегам фиордов и заливов, устья которых открыты к фронту волны [7].

Мировой опыт эксплуатации офшорных промыслов убедительно свидетельствует о том, что недоучет геодинамических факторов риска при освоении морских месторождений приводит к неоправданно большим экономическим потерям. Из 3000 аварий на морских промыслах мира 36% были связаны с потерями устойчивости и повреждениями платформ и трубопроводов, обусловленными геодинамическими факторами. Суммарные расходы на ликвидацию последствий аварий до 2010 г. составили 34 млрд долл. Например, на упомянутом месторождении Экофиск затраты на ликвидацию последствий наклона центральной платформы из-за проседания дна моря превысили 400 млн долл. [15]. Это побудило норвежское правительство принять в 2004 г. новый государственный стандарт NS 3491, регулирующий учет

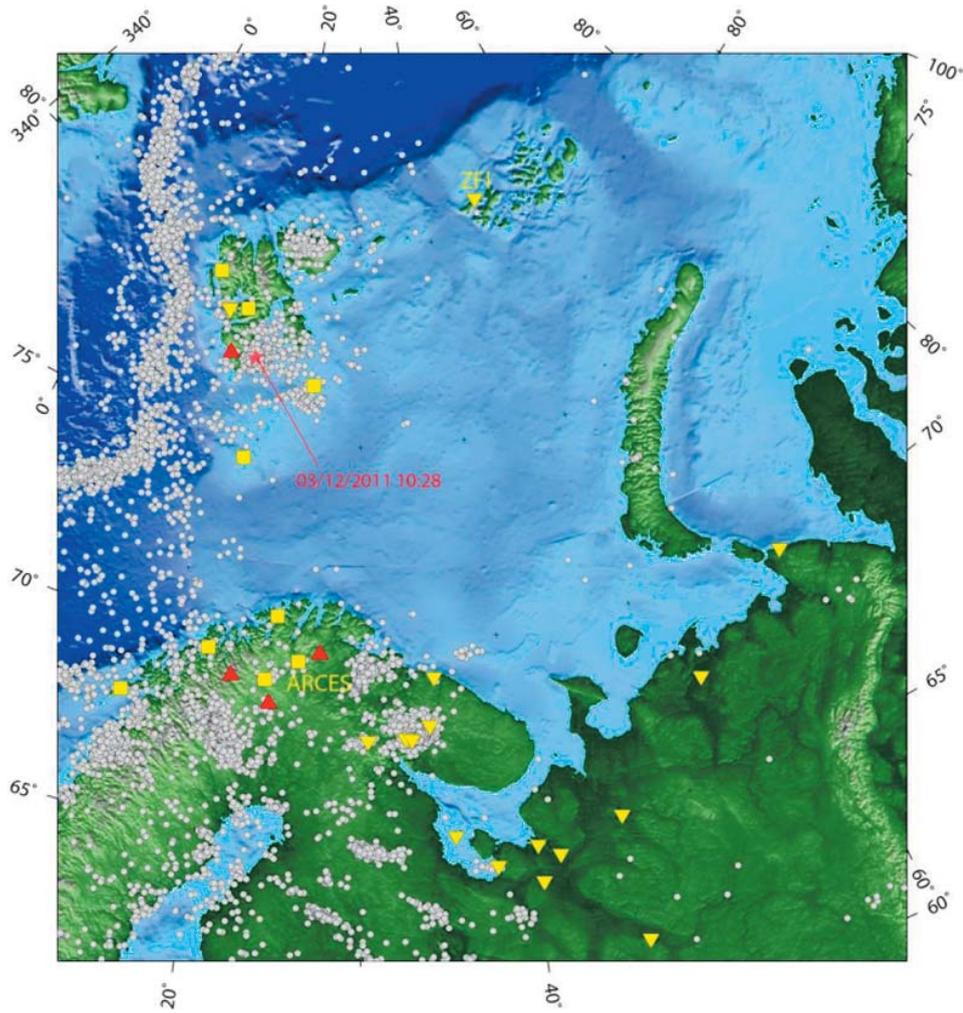


Рис. 3. Пространственное распределение сейсмических событий (серые кружки) в Евро-Арктическом/Баренцевом регионе. Квадраты и треугольники — действующие в настоящее время цифровые сейсмостанции Баренцевоморской мониторинговой сети [3; 8]

сейсмической опасности при строительстве морских промыслов.

В России пока законодательно не определены требования к компаниям — операторам морских промыслов по профилактике геофизических рисков, хотя после гибели буровой платформы «Deerwater Horizon» в Мексиканском заливе в 2010 г., принесшей экологический ущерб более 32 млрд долл., Экспертный совет по Арктике при председателе Совета Федерации 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» [1]. 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 восстановлению в стране собственной базы производства геофизического оборудования, освоения передовых технологий мониторинга состояния недр и опасных геологических процессов [10].

Вклад РАН в обеспечение безопасности морехозяйственной деятельности в Арктической зоне России

Научная политика Российской академии наук в части расширения горизонта знаний об условиях природопользования в Арктике и обеспечения

опережающей проработки тех проблем, по которым накопленный человечеством опыт работ в средних широтах оказывается недостаточным или малоприменимым в специфической арктической обстановке, выстраивается в полном соответствии с упомянутыми рекомендациями и приоритетами государственной стратегии [11; 13; 14].

В частности, в настоящее время уделяется особое внимание слабо изученным и до сих пор не получившим адекватной оценки факторам риска, связанным с современным «грязевым» вулканизмом и дегазацией донных осадочных формаций на арктическом шельфе, резко усилившимися в период потепления климата полярных областей вследствие деградации слоев твердых газогидратов метана в реликтовом горизонте субмаринной «вечной мерзлоты», сохранившихся на обширных площадях арктического шельфа [19; 20]. При прорыве газов к поверхности дна возникают грязевые вулканы, периоды активности которых отмечаются всплесками сейсмичности с энерговыделением на уровне $M = 2—4,5$. Кальдеры грязевых вулканов достигают в поперечнике нескольких километров, а крупнейший из закартированных на восточной окраине Баренцева моря грязевых вулканов Хакон-Мосби имеет диаметр около 30 км [17].

О масштабах нарушения геодинамического режима и его влияния на геологическую обстановку на шельфе можно судить на примере активного в настоящее время сейсмического ареала в проливе Стур-фиорд на юго-востоке архипелага Шпицберген. 22 февраля 2008 г. там произошло тектоническое землетрясение $M = 6,2$, обусловленное раскрытием раздвига в осевой части пролива. За этим мощным тектоническим событием (сильнейшим за столетнюю историю сейсмомониторинга в Западной Арктике) последовала аномально длительная серия (более 30 000) слабых землетрясений (афтершоков) магнитудой 1—4, не завершившаяся до момента написания этой статьи [4].

Наведенная фоновая сейсмичность в ареале «грязевого» вулканизма невысока (интенсивность сотрясений грунтов в эпицентре вряд ли превышает 5 баллов) и сама по себе не представляет опасности для инженерных сооружений, но достаточна для возбуждения многокилометровых оползней нелитифицированных осадков на неровностях дна и существенно изменяет экологическую ситуацию в акватории. В водной толще над активным ареалом сейсмичности, связанной с деятельностью флюидодинамических систем в осадочном чехле дна, происходит целенаправленная миграция рыбного населения пелагеали за пределы области сейсмостресса, что приводит к драматическим изменениям конфигурации и продуктивности рыбопромысловых зон в Баренцевоморском бассейне (рис. 4).

Еще одним перспективным направлением развития геофизического мониторинга в Арктике становится дистанционный контроль деструкции ледниковых

покровов на арктических островах. Практическая значимость этого вида мониторинга определяется возможностью раннего обнаружения схода в акваторию крупных айсбергов, потенциально опасных для судоходства и офшорных промысловых сооружений. На грани веков в Арктике усилились потери массы ледников вследствие повышения стока льда в море посредством откола айсбергов. В Баренцевом море суммарная длина фронта айсбергообразования достигает 3 000 км, а в базе данных ААНИИ Росгидромета за период с 1928 по 2007 гг. зарегистрировано 23 700 айсбергов в акватории, при этом наиболее крупные из них имели массу до 8 млн т и линейные размеры до 749 м по длинной оси [5].

Система течений в Баренцевом море организована таким образом, что айсберги, откалывающиеся от ледниковых покровов острова Северо-Восточная Земля архипелага Шпицберген, архипелага Земля Франца-Иосифа и Северного острова архипелага Новая Земля, выносятся в центральный район моря, достигая акваторий над газоносными структурами распределенного или подлежащего распределению фонда недр. Так, экспедицией ААНИИ в 2003 г. в акватории Штокмановского газоконденсатного поля было зарегистрировано 110 айсбергов, что позволило оценить вероятность катастрофического столкновения добычной платформы с крупным айсбергом как одно событие в интервале 35 лет [5]. На пике потепления в западной Арктике в 2007—2010 гг. айсбергообразование, по-видимому, активизировалось, о чем свидетельствует проявление до той поры неизвестных в регионе «льдотрясений» с магнитудами, приближающимися к классической области мощного айсбергообразования — Гренландии. Так, в октябре 2010 г. Баренцевоморская региональная сеть сейсмомониторинга зафиксировала вблизи Русской Гавани на Северном острове архипелага Новая Земля сейсмическое событие с $M = 4$ и нулевой глубиной сейсмического очага, что вызвало в западной прессе подозрение, не нарушили ли русские мораторий на ядерные испытания. Совместными усилиями Кольского филиала Геофизической службы РАН и НПЦ «Планета» Росгидромета благодаря комплексированию методов сейсмологического и космического мониторинга эти подозрения были оперативно развеяны. Детальная целенаправленная обработка космоснимков в эпицентральной области события за день до главного толчка и через день после него выявила сход в акваторию вблизи выводного ледника Визе самого большого из встреченных в Баренцевом море айсберга — его размер в плане был $0,8 \times 4$ км, что позволяет ориентировочно оценить массу от 100 до 300 млн т [9].

Есть основания полагать, что в ближайшие 10—15 лет ледовые условия в районах освоения углеводородных ресурсов в Карско-Баренцевоморской нефтегазовой провинции в целом не будут существенно отличаться от среднегодовых параметров последнего десятилетия, поэтому необходимо

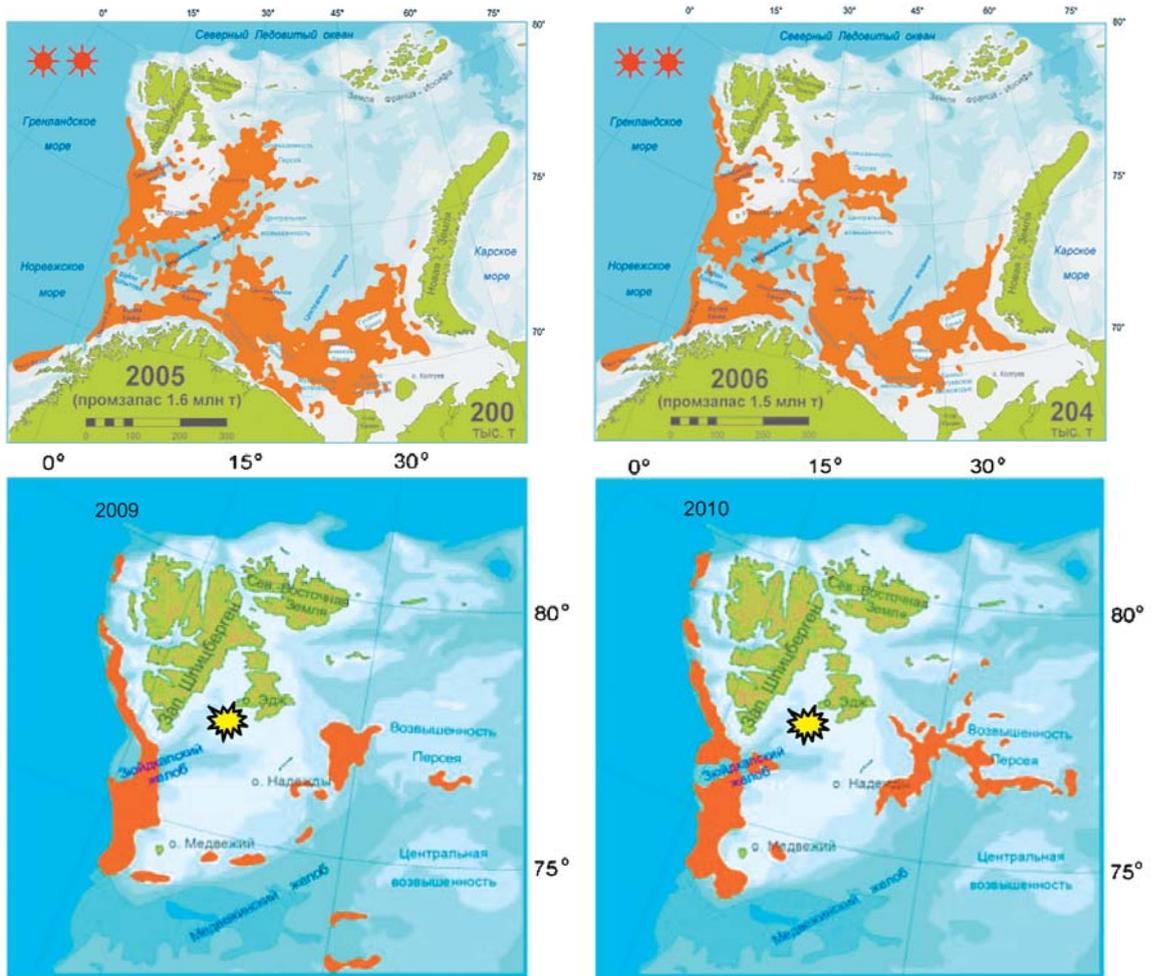


Рис. 4. Конфигурация продуктивных районов для промысла трески (показаны оранжевым цветом) в районе проливов Стурфюрд и Зюдкапп до и после землетрясения 21 февраля 2008 г. (по [6])

усилить системы контроля айсберговой опасности в зонах морских промыслов и на трассах транспортных коридоров. В частности, представляется целесообразной организация на островах, обрамляющих Баренцевоморскую нефтегазовую провинцию, геофизической мониторинговой сети, позволяющей своевременно обнаруживать мобилизацию выводных ледников и откалывание от них крупных айсбергов. Нет сомнения в том, что эффективность прогнозирования и раннего обнаружения опасных явлений в краевых зонах ледовых шапок будет повышена при применении инновационной технологии комплексирования сейсмологических и инфразвуковых методов контроля динамических процессов в криосфере, разработанной в Геофизической службе РАН. Определенным преимуществом сейсмоинфразвуковой сети мониторинга перед космической и высотной фотосъемкой является работоспособность системы при любом состоянии облачного покрова и в период полярной ночи, когда другие средства визуального контроля Арктики «слепнут».

Программа развития сети сейсмоинфразвукового мониторинга зон промышленного освоения западно-арктического шельфа

В 2010 г. экспертная группа РАН под руководством вице-президента РАН академика Н. П. Лаврова представила в правительственные органы ряд аналитических докладов, в которых была 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 (землетрясений, грязевого вулканизма и оползневых явлений на морском дне), криосфере (деструкции ледниковых шапок на арктических островах с проявлением мощных льдотрясений и сходом в акваторию моря крупных айсбергов) и атмосфере (вторжения болидов, падения фрагментов космических аппаратов и ракет). Оперативным практическим откликом на рекомендации РАН стало



Рис. 5. Концептуальная схема Баренцевоморско-Карской сети сейсмоинфразвукового мониторинга геодинамического режима шельфа западной Арктики. Условные знаки: желтые «шары» – сейсмоинфразвуковые комплексы (СИЗК), подобные действующему прототипу – СИЗК «Апатиты» [19]; желтые «кнопки» – трехкомпонентные сейсмостанции; красные «капли» – крупнейшие месторождения нефти («О») и газа («G»), намеченные к первоочередному освоению; красные «пятна» – перспективные нефтегазовые поля на границе морских владений России и Норвегии, подлежащие разведке и освоению до 2020 г.

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 г., специального задания по формированию в 2013–2015 гг. Баренцевоморско-Карского сегмента системы геофизического мониторинга (БКС СГМ) и комплексного контроля разномасштабных динамических явлений природного и техногенного генезиса в пределах подлежащих освоению нефтяных и газовых полей Арктической зоны Российской Федерации.

В оптимальной конфигурации БКС СГМ должен состоять из двух подсистем: береговой сети сейсмоинфразвукового мониторинга и донной сети сейсмомониторинга, но в утвержденной версии федеральной целевой программы до 2015 г. запланировано выделение 43 млн руб. только на формирование береговой сети по периметру Баренцева моря (рис. 5).

Предложенная ГС РАН концептуальная схема обустройства береговой сети БКС СГМ обеспечит обнаружение и точную локацию событий магнитудой 2

и даст возможность определять координаты гипоцентров толчков в контурах и в ближней периферии будущих мульд проседания, формирующихся над отработываемыми нефтегазовыми месторождениями. С целью формирования системы раннего предупреждения о возникновении айсберговой опасности целесообразно создать СИЗК в районах потенциального айсбергового стока на архипелаге Шпицберген (в российских поселках Баренцбург или Пирамида) и на архипелаге Земля Франца-Иосифа (оптимальное размещение на острове Хейса с созданием единого мониторингового комплекса с действующей метеорологической обсерваторией Росгидромета), на Северном острове архипелага Новая Земля в районе населенного пункта Русская Гавань или в поселке Малые Кармакулы (в комплексе с одноименной метеообсерваторией).

Заключение

Потребность в модернизации систем дистанционного геофизического мониторинга в Арктической зоне Российской Федерации, в первую очередь

в западной Арктике, резко возросла в связи с быстрым увеличением масштабов морехозяйственной деятельности, нацеленной на реализацию утвержденного в 2013 г. государственного плана мероприятий по реализации Стратегии развития АЗРФ и укрепления национальной обороны. Российская академия наук активно включилась в реализацию этого плана. Научный и технологический задел, созданный в институтах РАН, позволяет существенно повысить эффективность работы региональной сети геофизического мониторинга и обеспечить тем самым надежный оперативный и непрерывный контроль проявлений опасных геодинамических процессов на площадях активной морехозяйственной деятельности в Баренцево-морско-Карской нефтегазоносной провинции и Северном рыбопромысловом бассейне.

С учетом труднодоступности и малонаселенности мест предполагаемого размещения мониторинговых комплексов и последующей долговременной эксплуатации мониторинговой сети необходима тесная кооперация РАН, Росгидромета, МЧС, а также техническая поддержка со стороны Минобороны и Пограничной службы ФСБ, организационное содействие со стороны региональных властей и администраций муниципалитетов. Прямую заинтересованность в реализации проекта должны бы иметь и нефтегазовые компании, действующие в западной Арктике, однако ни одна из них пока не предприняла никаких шагов по увязке в единую систему создаваемой региональной сети с локальными корпоративными системами геофизического мониторинга.

Литература

1. 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., 2011. — 80 с.
2. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года // Арктич. ведомости. — 2013. — № 1 (5). — С. 162—182.
3. Антоновская Г. Н., Конечная Я. В., Морозов А. Н. Сейсмическая активность Арктической зоны: новые данные по западному сектору // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 2 (96). — С. 16—24.
4. Баранов С. В. Афтершоковый процесс землетрясения 21.02.2008 г. в проливе Стур-Фиорд (архипелаг Шпицберген) // Вулканология и сейсмология. — 2013. — № 3. — С. 1—15.
5. Бузин И. В., Глазовский А. Ф., Гудошников Ю. П. и др. Айсберги и ледники Баренцева моря: исследование последних лет. — Ч. 1: Основные продуцирующие ледники, распространение и морфометрические особенности айсбергов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2008. — № 1. — С. 66—80.
6. Виноградов А., Баранов С., Жичкин А., Моисеев Д. Влияние сейсмичности на распределение рыбных скоплений на западной окраине Баренцево-морского бассейна // Рыб. ресурсы. — 2011. — № 2. — С. 18—21.
7. Виноградов А. Н., Виноградов Ю. А., Асминг В. Э., Баранов С. В. Сейсмичность Баренцево-морского шельфа и обеспечение геодинамического мониторинга при

эксплуатации Штокмановского газоконденсатного месторождения // Материалы Международной конференции «Нефть и газ Арктического шельфа 2006», Мурманск, 15—17 ноября, 2006 г. Секция 5. Геоэкология, мониторинг и охрана окружающей среды / Ассоциация «Арктик-Шельф». — Мурманск, 2006. — С. 63—66.

8. Виноградов А. Н., Виноградов Ю. А., Кременецкая Е. О., Петров С. И. Формирование системы сейсмологического и инфразвукового мониторинга в Западной Арктике в XX веке и перспективы ее дальнейшего развития // Вестн. Кольского науч. центра. — 2012. — № 4. — С. 145—163.
9. Виноградов Ю. А., Виноградов А. Н., Кровотынцева В. А. Применение геофизических методов для дистанционного контроля динамики процессов деструкции ледовых покровов Арктики // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Шестой Международной сейсмологической школы, Апатиты, 15—19 августа 2011 г. / ГС РАН. — Обнинск, 2011. — С. 87—89.
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. Калинин В. Т., Виноградов А. Н. Актуальные задачи научного обеспечения освоения и развития Арктической зоны России // Российский Север: модернизация и развитие. — Вып. 1. — М.: Центр стратегич. партнерства, 2012. — С. 296—301.
12. Крапивнер Р. Б. О неотектонической активности и сейсмичности Баренцево-морского шельфа // Материалы международной конференции «Нефть и газ Арктического шельфа 2006» / Ассоциация «АрктикШельф». — Мурманск, 2006. (CD-ROM).
13. Лавров Н. П. О вкладе Российской академии наук в современное освоение и развитие Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1 (13). — С. 4—9.
14. 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.
15. Мельников Н. Н., Калашник А. И. Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты / КНЦ РАН. — Апатиты, 2009. — 140 с.
16. Hafliðason H., Sejrup H. P., Nygard A. et al. The Storegga Slide: Architecture, geometry and slide development // Marine Geology. — 2004. — Vol. 213. — P. 201—234.
17. Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow: The impact on geology, biology, and the marine environment. — [S. l.]: Cambridge Univ. Press, 2007. — 476 p.
18. Ottemöller L., Nielsen H. H., Atakan K. et al. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea // J. of Geophysical Research. — 2005. — Vol. 110. — P. 1—15. — B10301, doi:10.1029/2004JB003374.
19. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A. et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. — 2010. — Vol. 327. — P. 1246—1250.
20. Thatcher K. E., Westbrook G. K., Sarkar S., Minshull T. A. Methane release from warming-induced hydrate dissociation in the West Svalbard continental margin: Timing, rates, and geological controls // J. Geophys. Res. Solid Earth. — 2013. — Vol. 118. — P. 22—38. — doi:10.1029/2012JB009605.
21. Vinogradov A. N., Baranov S. V. Recent geodynamic regime of the Eurasia — North American interplate boundary: Evidences from seismology of Arctic // Труды Мурман. гос. технич. ун-та, 2012. — Т. 15, № 2. — С. 435—438.