

## СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НИИГА–ВНИИОКЕАНГЕОЛОГИЯ В АРКТИКЕ (ИСТОРИЯ, ДОСТИЖЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ)

д-р геол.-минерал. наук Г.П.АВЕТИСОВ

ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, avet@vniio.nw.ru

*В статье представлена информация о сейсмологических исследованиях НИИГА–ВНИИ-Океангеология в Арктике. Экспедиционные наблюдения были начаты в 1968 г. и велись на Земле Франца-Иосифа, Новосибирских островах, в Западной Якутии, Норильском районе, дельте р. Лены. Выявлены особенности глубинного геологического строения этих областей. Создан электронный банк арктических сейсмологических данных. На основе анализа и обобщения всех имеющихся инструментальных данных по арктическим землетрясениям изучены их гипоцентрия и фокальные механизмы. Получены представления о современной геодинамике Арктического региона.*

*Ключевые слова:* Арктика, землетрясения, банк данных, фокальные механизмы, геодинамика, геологическое строение.

Сейсмологические исследования НИИГА–ВНИИОкеангеология были начаты в 1968 г. В их проведении можно выделить два одновременных отрезка.

### ЭТАП ЭКСПЕДИЦИОННЫХ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ 1968–1988 гг.

Первый сейсмологический отряд входил в состав Арктической партии НИИГА (руководители: Б.В.Гусев, А.Л.Пискарев, Я.В.Неизвестнов, А.Ф.Салманов), проводившей договорные инженерно-геологические работы на Земле Франца-Иосифа.

28 июля 1968 г. в пункте «Нагурская» была организована сейсмологическая станция, которая вела регистрацию в течение двух лет. В 200 км к востоку на о. Хейса работала в этот период телесеismicкая станция «Хейс». Главной задачей наблюдений была оценка возможной сейсмической опасности для сооружений, строительство которых предполагалось на самом западном острове арх. Земля Франца-Иосифа – Земле Александры.

За два года удалось зарегистрировать несколько слабых землетрясений к северо-западу от архипелага в районе подводного желоба Франц-Виктория, в северной части которого уже тогда были известны два сильных события. 2 сентября 1969 г. обеими станциями достаточно уверенно впервые зарегистрировано землетрясение к востоку от архипелага в зоне подводного желоба Св. Анны. Помимо данных по местной сейсмичности, на основе уверенной регистрации далеких событий по методу обменных волн землетрясений (МОВЗ) оценивалось глубинное строение земной коры и верхней мантии в районе станций.

В последующие годы в силу геологической направленности исследований института главной задачей сейсмологических наблюдений, определявшей необходимость постановки сейсмологических работ, выбор районов исследований и системы расстановки регистраторов, стало изучение глубинного геологического строения.

После годичного перерыва сейсмологический отряд вошел в состав Восточно-Сибирской комплексной партии (руководители: В.Л.Иванов, В.Н.Зенков,

Г.В.Ладыка, Д.А.Вольнов, А.Л.Пискарев). Это подразделение НИИГА проводило комплексные исследования на Новосибирских островах, направленные на создание геолого-геофизических реперов для последующего изучения шельфовых акваторий.

В течение летних полевых сезонов 1972–1976 гг. отряд провел наблюдения на Новосибирских островах. Использовалась та же аппаратура, что и на Земле Франца-Иосифа.

В сезон 1972 г. наблюдения были проведены в одной точке в районе полярной станции «Темп», в последующие годы осуществлялась одновременная регистрация в двух пунктах, причем в 1976 г. одна из станций в течение сезона переставлялась. В качестве станционных помещений использовались в различные годы специально оборудованная палатка, пустующие дома действующих или брошенных полярных станций, избы и поварни промышленников. Всего отработано 8 пунктов наблюдений.

За весь период наблюдений, который в общей сложности составил 10 месяцев, в районе Новосибирских островов, ранее считавшемся асейсмичным, было зарегистрировано порядка 120 землетрясений, для 32 из которых удалось определить координаты эпицентра. Установлено, что эпицентры достаточно уверенно трассируют контакты тектонических блоков различного времени консолидации. Высказано соображение о наведенном или «пассивном» характере сейсмичности этого региона, обусловленной разрядкой в ослабленных участках литосферы тектонических напряжений, генерируемых в зоне центральнолаптевоморского рифтогенеза. По данным далеких землетрясений оценено глубинное строение архипелага и прилегающих регионов.

В период 1974–1976 гг. с использованием той же аппаратуры и практически теми же ведущими специалистами велись сейсмологические наблюдения на меридиональном профиле в Западной Якутии от г. Мирный до побережья моря Лаптевых. Основная задача исследований заключалась в получении данных по глубинному строению литосферы, использованных в дальнейшем для разработки критериев прогноза коренных месторождений алмазов (отв. исполнитель тематических исследований – А.Л.Пискарев). Три самых северных станции регистрировали землетрясения в районе южного побережья моря Лаптевых и устья Хатангского залива.

В течение 1976–1978 гг. проведены наблюдения на советских рудниках Баренцбург и Пирамида, на южном острове арх. Новая Земля.

В 1979 г. отряд был оснащен наиболее современной отечественной аппаратурой с магнитной записью «Черепеха», предназначенной для экспедиционных сейсмологических работ, и в течение полевых сезонов 1979–1983 гг. проводил сейсмологические и сейсмические наблюдения с целью изучения глубинного строения земной коры и верхней мантии Норильского рудного района. Были отработаны четыре профиля общей протяженностью свыше 700 км. За весь период наблюдений в указанном регионе не зафиксировано ни одного местного или близкого землетрясения.

В апреле–мае 1984 г. проведены наблюдения на крайней северной точке архипелага Северная Земля мыс Арктический. Зарегистрировано несколько землетрясений со Срединно-Арктического хребта, а также довольно значительное количество сейсмоявлений на расстояниях в первые километры и десятки километров, большинство из которых, скорее всего, связаны с подвижками в ближайшем ледниковом куполе.

В течение полевых сезонов 1985–1988 гг. сейсмологический отряд, оснащенный 12 регистраторами «Черепеха», проводил авиадесантные профильно-площадные наблюдения в дельте р. Лены и на побережье губы Буор-Хая на вертолетах Ми-8, базировавшихся в аэропорту Тикси. Помимо далеких землетрясений, использовавшихся для изучения глубинного строения земной коры, было за-

регистрировано свыше 140 местных и близких землетрясений, для 121 из которых определены координаты гипоцентра. На основании полученной информации высказано несколько новых соображений относительно геодинамики этого региона, в какой-то степени меняющих прежние представления.

Основные геологические результаты исследований I этапа следующие:

1. По материалам наблюдений на Земле Франца-Иосифа построена схема сейсмического микрорайонирования архипелага [1], а после привлечения дополнительных геолого-геофизических данных схема тектоносейсмического районирования Евразийского суббассейна и прилегающих шельфов [2]. Установлена 8-балльная зона Срединно-Арктического хребта Гаккеля; в пределах арктического шельфа Евразии повышенной 7-балльной сейсмичностью обладают участки поперечных разломов Франц-Виктория, Св. Анны и Воронина.

2. Получена первая информация о глубинном строении земной коры архипелага Земля Франца-Иосифа [3]. Установлена континентальная кора мощностью 24–26 км.

3. Получена первая информация о глубинном строении земной коры архипелага Новосибирские острова [4 и др.]. Показано, что для глубинной структуры архипелага характерны те же черты, что и для всего шельфа Евразии: относительно мощная (25–30 км) разбитая на блоки, гетерогенная континентальная кора.

4. Выявлены ранее неизвестные участки повышенной сейсмичности на Новосибирских островах, что обеспечило дополнительную независимую информацию, необходимую для тектонического районирования региона [5 и др.].

5. Получены данные о глубинном строении земной коры Западной Якутии [19 и др.].

6. По материалам ГСЗ–МОВЗ получены данные о глубинном строении земной коры Норильского рудного района [6]. Установлена ее индивидуальность: большая плотность дизъюнктивов, свидетельствующая о высокой магматической проницаемости коры; наличие серии коровых и транскоровых разломов, часть которых контролирует пространственное распределение медно-никелевых месторождений; дискретный характер внутриблоковой сейсмической расслоенности. Общая мощность земной коры составляет 39–46 км.

7. Получены данные о глубинном строении земной коры дельты р. Лены [8, 9]:  
– сейсмологические наблюдения над далекими и близкими землетрясениями в совокупности с данными КМПВ позволили уточнить положение южного завершения Усть-Ленского прогиба: западный его борт проходит не вдоль восточного края дельты р. Лены, а в пределах ее, по разломам зоны Лено-Таймырских пограничных поднятий. Установлена асимметричность поперечного сечения прогиба, проявляющаяся в более контрастном характере западного его борта по сравнению с восточным. Это связано, по-видимому, с особенностями древней структуры литосферы, определяющей характер наложенной структуры прогиба, а также с направленностью современных тектонических процессов;

– мощность мезокайнозойских отложений в осевой части прогиба достигает 5 км, в районе западного борта – 2–3 км;

– мощность земной коры в прогибе (26–28 км) несколько меньше, чем в структурах обрамления, что позволяет говорить о существовании валообразного поднятия по подошве земной коры (раздел М). Поперечное сечение этого поднятия асимметрично: в западном обрамлении погружение раздела М больше (28–36 км), чем в восточном (29–31 км). Скорость продольных волн в кровле нижней мантии понижена – 7,5 км/с. Последние факторы, а также данные о повышенной сейсмичности прогиба и расположении его на продолжении рифтогенного пояса глубоководной части Северного Ледовитого океана свидетельствуют о рифтогенной природе Усть-Ленского прогиба;

— сделан вывод о том, что указанное сочетание генетических (рифтогенная природа) и структурных особенностей (большая мощность осадочного чехла) прогиба означает присутствие здесь необходимых и достаточных геологических факторов, благоприятных как для нефтегазообразования, так и для нефтегазонакопления. Плитный чехол, в пределах которого известны и хорошие коллекторы (слои алевритов, песчаников), и надежные покрышки (мощные пакчи глины), может быть признан самостоятельным потенциальным нефтегазоносным комплексом.

8. Уточнены гипоцентры и фокальные механизмы землетрясений дельты Лены и прилегающей акватории [7 и др.].

Установлено, что в районе дельты р. Лены и ее обрамления наблюдается не рассеянное, как представлялось ранее, а достаточно упорядоченное распределение эпицентров в две основные сублинейные зоны (рис. 1).

Эпицентры первой, менее явной, из зон трассируют близосевую область губы Буор-Хая. Распределение эпицентров в пределах этой зоны неравномерное. Очевидное сгущение отмечается в 30–40 км к востоку от п-ова Быковский в районе  $72^\circ$  с.ш. и  $130^\circ$  в.д. В непосредственной близости от этого сгущения находился эпицентр Быковского землетрясения с магнитудой 5,4, зарегистрированного 21 июля 1964 г. Южнее плотность эпицентров также довольно высока до широты  $71^\circ 20'$ . Севернее  $72^\circ$  с.ш. в зоне сочленения губы с основной акваторией моря Лаптевых плотность эпицентров заметно падает до полного вырождения.

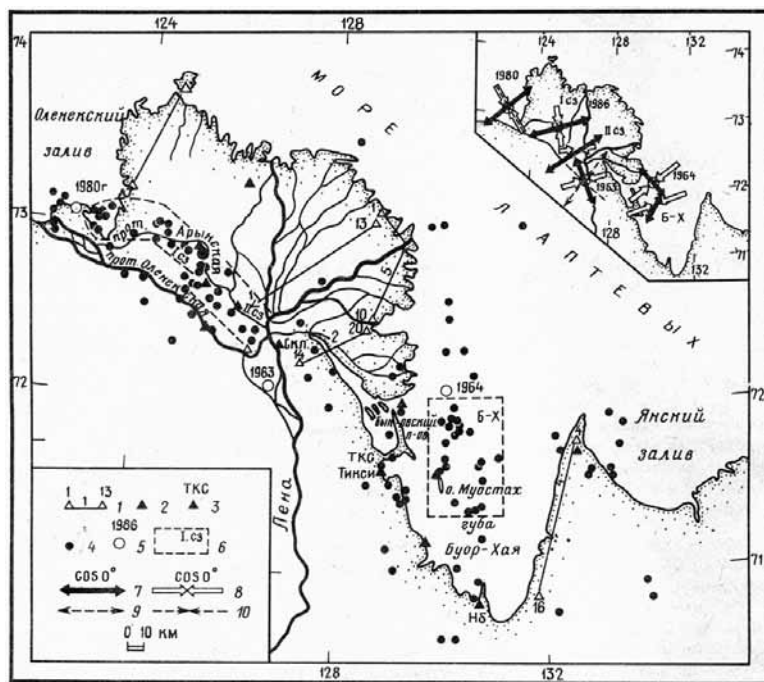


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных станциями ВНИИОкеангеология в 1985–1988 гг.

Пункты наблюдений: 1 – профили; 2 – одиночные; 3 – стационарные станции.

Эпицентры землетрясений: 4 – зарегистрированные станциями ВНИИОкеангеология; 5 – заимствованные с указанием года; 6 – участки зон эпицентров, объединенных для групповой обработки.

Механизмы очагов землетрясений (врезка): 7 – растяжение; 8 – сжатие (длина стрелки пропорциональна косинусу угла наклона оси к горизонту); 9, 10 – то же, что и 7, 8 – по данным [23]

Вторая, значительно более очевидная, зона прослеживается вдоль западного побережья губы Буор-Хая и ее горного обрамления, протягиваясь на север до широты  $72^{\circ}-72^{\circ}15'$ , затем резко поворачивает на северо-запад, огибая северную оконечность Хараулахских гор, и густой полосой уходит через центральную часть дельты в Оленекский залив. В период экспедиционных наблюдений 15 июня 1986 г. здесь зарегистрировано сильное землетрясение с магнитудой 4,6, имевшее за 2 суток 18 афтершоков.

Кроме двух указанных зон, отмечается группа эпицентров в районе восточного побережья губы Буор-Хая, а также несколько в Янском заливе.

Факт установления в пределах дельты и ее непосредственного обрамления локализованных сейсмоактивных зон позволил отказаться от понятия «область рассеянного рифтогенеза» [18] и предположить различную тектоническую природу повышенной сейсмичности каждой из зон.

Бессменным руководителем сейсмологического подразделения был Г.П.Аветисов, ведущими специалистами в разные годы – Б.Т.Барычев и В.В.Васильев.

### ЭТАП ТЕМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1989–2009 гг.

В конце 1980-х гг. в связи с резким ухудшением финансового обеспечения геологической отрасли экспедиционные сейсмологические наблюдения в Арктике были прекращены. Казалось бы, наступил полный крах: нет новых наблюдений – нет исследований. Однако это правило справедливо для любого другого геолого-геофизического метода, но только не для сейсмологического. Регистрация землетрясений, в том числе и арктических, продолжается мощной международной сетью станций, независимо от экономического положения какой-либо организации и даже такой огромной страны, как Россия. Непрерывно поступающая сейсмологическая информация общедоступна и может быть использована любым исследователем в полном объеме. Конечно, в этой ситуации исчезает возможность проведения детальных исследований в каких-либо ключевых, наиболее интересных участках, но есть и свои весьма существенные плюсы. Раньше сейсмологи по несколько месяцев в году проводили на полевых работах, имея весьма ограниченное время для обработки и осмысливания результатов наблюдений, сбора, обобщения и анализа сейсмологической информации по прилегающим регионам. Теперь это время появилось, представилась возможность оценить общеарктическую сейсмическую обстановку, определить место в ней выявленных при экспедиционных наблюдениях локальных участков повышенной сейсмичности, установить связи арктических сейсмоактивных зон с глобальными сейсмическими поясами.

Для решения этих задач во ВНИИОкеангеология был разработан электронный банк арктических сейсмологических данных (АРС), в котором собрана инструментальная и макросейсмическая информация о землетрясениях Арктического региона и прилегающих областей за период с конца XIX столетия по настоящее время [12, 21].

Система управления АРС позволяет производить выборки землетрясений по временным и географическим параметрам, расчет и построение графиков выделенной сейсмической энергии  $E$  с дискретностью год по любой произвольной выборке землетрясений, расчет и построение графиков коэффициента корреляции  $R = f(t)$ , где  $t$  – сдвиг по времени от 0 до 10 лет, между зависимостями  $\lg E = f(t, \text{год})$  для различных выборок, расчет формул связи между различными определениями магнитуд и на основе их определение унифицированной магнитуды для любой выборки землетрясений. На основе унифицированной магнитуды возможен расчет и построение помагнитудных и кумулятивных графиков повторяемости землетрясений. Предусмотрено нормирование графиков к единице пространства и введение различных весов точек при их аппроксимации.

Заложенная в банк информация делает его наиболее полным из существующих источником фактических сейсмологических данных по Арктике и прилегающим регионам. Вычислительные возможности системы управления банком данных обеспечивают расчет ряда важных параметров сейсмического режима. Наличие указанного банка данных позволяет ставить и решать целый круг вопросов, касающихся особенностей сейсмических процессов в Арктике в целом и в отдельных ее регионах, динамики литосферы, тектонической природы повышенной сейсмичности, оценки сейсмической опасности.

На базе всей совокупности информации, собранной в АРС, были проведены различные тематические исследования, позволившие разработать современную геодинамическую модель региона, определить главные параметры сейсмичности как основы для построения карт сейсмического районирования. Результаты указанных исследований отражены в ряде тематических отчетов, хранящихся в фондах ВНИИОкеангеология, и в публикациях [10, 11, 13–15, 20, 22].

Последним на сегодняшний день исследованием явился основанный на новейшей сейсмологической информации анализ сейсмических характеристик Срединно-Арктического пояса землетрясений, маркирующего океаническую часть современной дивергентной границы Северо-Американской и Евразийской литосферных плит.

### ЭПИЦЕНТРИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Главной особенностью латерального распределения землетрясений в пределах узколинейного пояса является его очевидная разнопорядковая фрагментарность. Ей отвечает фрагментарность самого хребта, раздробленного поперечными разломами на участки различной протяженности. О фрагментарности выше-

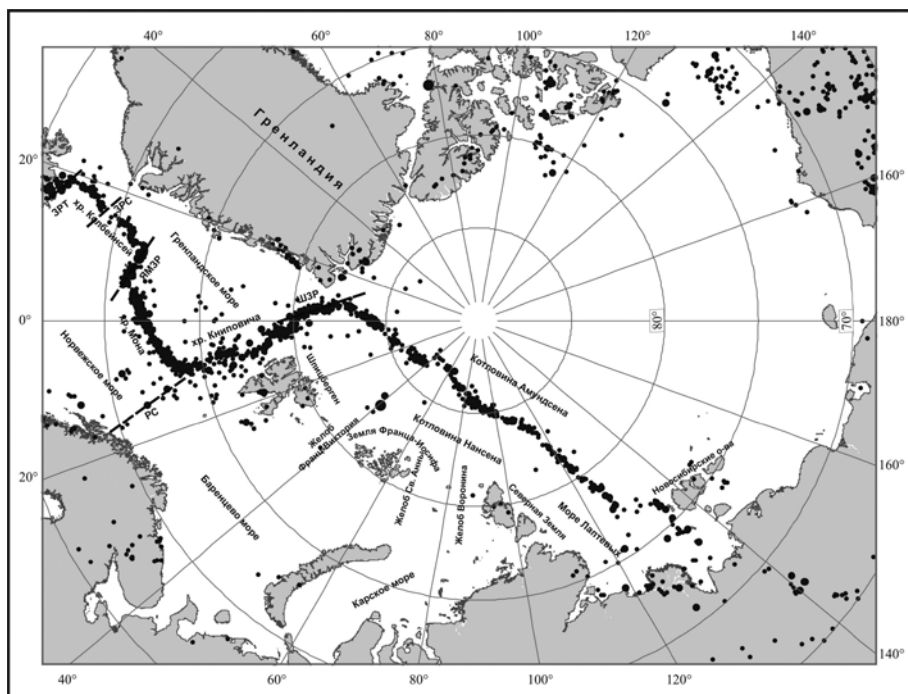


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Северного Ледовитого океана за период 1964–2005 гг. Магнитуды: 1 – 4,0–4,9; 2 – 5,0–5,9; 3 –  $\geq 6,0$ ; 4 – зоны разломов. ЗРТ – Тьорнес, ЗРС – Спар; ЯМЗР – Ян-Майенская, РС – Сенья; ШЗР – Шпицбергенская

го порядка в первую очередь можно говорить, касаясь Норвежско-Гренландского бассейна, так как там явно выражены три характерных сегмента, а именно, хребты Колбейнсей, Мона, Книповича, разделенные и смещенные зонами трансформных разломов Тьорнес и Ян-Майенской (рис. 2). Такого же порядка фрагментом, ограниченным Шпицбергенской зоной разломов и Лаптевским континентальным склоном, является и хребет Гаккеля в Евразийском суббассейне. В пределах этих сегментов распределение эпицентров отличается своеобразием, отражающим особенность конкретной геодинамической обстановки.

На хребте Колбейнсей линия эпицентров, по сути, состоит из двух отрезков: южного, от зоны разломов Тьорнес до разлома Спар, являющегося океаническим продолжением разломной зоны фьорда Скорсбисунн на восточном побережье Гренландии, и северного, примыкающего к Ян-Майенской зоне разломов. Между ними расположен участок, в пределах которого за всю историю инструментальных наблюдений не зарегистрировано ни одного землетрясения. Как на северном, так и на южном участках нередки случаи рассеивания эпицентров или их поперечного смещения. В целом прерывистая линия эпицентров хребта Колбейнсей может быть аппроксимирована дугой, слабо выгнутой на северо-запад.

На хребте Мона характер распределения эпицентров существенно меняется: они группируются в практически непрерывную узкую линию, проходящую вдоль осевой линии хребта. Единственное заметное нарушение линейности, связанное, по-видимому, с поперечным разломом, можно отметить в районе  $0^\circ$  долготы. В целом четкая линия эпицентров хребта Мона может быть аппроксимирована дугой, достаточно заметно выгнутой на юго-восток. Характерной особенностью является то, что уверенно прослеживаемая эпицентрами Ян-Майенская зона разломов явно не ортогональна в плане простирающихся прилегающих к ней с юга и севера фрагментов хребтов.

На хребте Книповича в распределении эпицентров очевидна кардинальная перестройка. Вслед за хребтом эпицентральная зона поворачивает почти под прямым углом на север и приобретает субмеридиональное простираение. Линия эпицентров превращается в полосу, достигающую в отдельных местах ширины 150–170 км. В пределах полосы отмечаются сгущения эпицентров, наиболее крупные из которых расположены в зоне стыка с хребтом Мона, а также в районе  $76^\circ$  и  $77\text{--}78^\circ$  с.ш. Севернее  $78^\circ$  линейность зоны улучшается, отмечаются резкие изменения ее простираения вслед за простирающимися трассируемых ею подводных структур трога Моллой и хребта Моллой. За широтой  $80^\circ$  при переходе к Шпицбергенской зоне разломов простираение линии эпицентров становится стабильно северо-западным.

В Евразийском суббассейне (котловины Нансена и Амундсена) узколинейный характер эпицентральной зоны сохраняется на всем ее протяжении. На западе в самой узкой части суббассейна между Гренландским континентальным склоном и плато Ермак эпицентры трассируют глубоководную долину Лены, имеющую северо-северо-западное простираение, а затем широтно ориентированную осевую и близосевую зоны срединно-океанического хребта Гаккеля. Сейсмический пояс хребта Гаккеля практически на всем своем протяжении имеет постоянное простираение и среднюю ширину, не превышающую 20–30 км. Наиболее заметные отклонения эпицентров от осевой линии устанавливаются на участке между  $40^\circ$  и  $80^\circ$  в.д., где линейный фрагмент пояса длиной порядка 300 км смещен к северу на 100–120 км в своей западной части и далее на восток относительно плавно выходит на генеральную осевую линию. Согласно батиметрическим данным, на этом участке становится менее отчетливой, вплоть до полного исчезновения, рифтовая долина. Следует отметить, что указанные участки нарушения непрерывности срединно-океанического сейсмического пояса находятся в створе с выделяемыми на шельфе Евразии субмеридиональными желобами Франц-Виктория и Воронина.

В целом непрерывный сейсмический пояс дискретен по плотности эпицентров. Это особенно очевидно, если рассматривать в первую очередь сильные землетрясения с магнитудой свыше 5.

При переходе на шельф моря Лаптевых единая полоса срединно-арктических землетрясений раздваивается (рис. 2). Одна, наиболее надежно устанавливаемая ветвь идет сначала на юго-восток, затем в меридиональном направлении проходит западнее Новосибирских островов в южную часть моря и далее до континента. Здесь она соединяется с наземно-прибрежной полосой эпицентров северо-западного простирания. Вторая, более разреженная ветвь имеет юго-юго-западное простирание и также прослеживается до континента.

Как следует из сказанного выше, два из четырех главных фрагментов Срединно-Арктического сейсмического пояса, участки хребтов Мона и Гаккеля, характеризуются узколинейным, относительно равномерным распределением эпицентров, два же других, Колбейнсей и Книповича, заметно рассеянным и значительно менее упорядоченным. Очевидно, что особенности распределения эпицентров землетрясений являются одним из показателей особенностей геодинамической обстановки региона. В данном случае эти особенности состоят в том, что первая пара фрагментов соответствует типично спрединговым хребтам. Они занимают медианное положение в океаническом бассейне, на всем своем протяжении обладают наиболее типичными для срединно-океанических хребтов геоморфологическими характеристиками: резкий рельеф, отчетливо выраженная осевая рифтовая долина, практически полное отсутствие осадков вблизи оси при значительном увеличении их мощности по направлению к периферии. Магнитное поле обрамляющих эти хребты котловин имеет ярко выраженный спрединговый характер с полным набором симметричных аномалий.

Хребты Колбейнсей и Книповича, безусловно, должны считаться аномальными участками Срединно-Арктического хребта. Они занимают резко асимметричное положение в океаническом бассейне, находясь в непосредственной близости к одному из его бортов, не имеют четкой геоморфологической выразительности, будучи представленными несколькими грядами различной протяженности с изменчивой высотой и шириной. Полосовидность аномального магнитного поля обрамляющих котловин менее очевидна, особенно в случае хребта Книповича, по обе стороны от хребтов количество аномалий различно.

Набор геолого-геофизических характеристик, в том числе и распределение эпицентров землетрясений, говорит о том, что геодинамическая обстановка в районе хребтов Мона и Гаккеля определяется единственным или резко доминирующим процессом — спредингом океанического дна. Сами хребты и обрамляющая их литосфера океанического бассейна сформировались под действием этого процесса и по его законам и потеряли какую-либо тектоническую связь с окружающей континентальной окраиной.

Другая ситуация имеет место для второй пары фрагментов.

На наш взгляд, особенности современной геоморфологии района хребта Книповича, его разломной тектоники, сейсмичности и динамики определились тем, что продвигающийся от хребта Мона межплитный раскол внедрился под углом, не равным прямому, в пределы сложно построенного блока литосферы, аналогичного современному Шпицбергенскому блоку и являвшегося ранее его западной частью. Фронтальная граница этого блока проходила по разломной зоне, составлявшей, по-видимому, единую линию с современной зоной разломов Сенья. Эта линия имела такое же северо-северо-западное простирание, что и основная каледонская система разломов на архипелаге Шпицберген. Подобное же простирание унаследовали горные цепи и впадины хребта Книповича. Секущие хребет разломы также связаны с системой разломов со-



ответствующего простирания, которые на Шпицбергене в эпоху каледонской складчатости имели подчиненное значение, но проявились в период кайнозойского тектонического оживления, приведшего в результате к образованию системы крупных широтно ориентированных фьордов. Крупная поперечная зональность хребта Книповича четко проявляется в распределении эпицентров землетрясений, которые, как указывалось выше, образуют три сгущения, разделенных зонами пониженной сейсмичности. Нетрудно заметить, что такой же ориентировки крупно блоковая зональность легко обнаруживается на острове Западный Шпицберген. Бросается в глаза, что участки пониженной сейсмичности на хребте Книповича располагаются в створе простирания опущенных блоков: Зюйдкапского желоба к югу от острова, системы мощных Ис-фьорда и Беллсунн-фьорда в центре и морского обрамления острова на севере. На траверзе наиболее явных сгущений эпицентров в районе  $76^\circ$  и  $78^\circ$  находятся поднятые блоки южной и северной частей острова.

Заметное влияние на спрединговый процесс современной тектоники континентальной литосферы Восточной Гренландии можно предположить для района хребта Колбейнсей, ставшего межплитной границей уже после начала спрединга в Норвежско-Гренландском бассейне в результате перескока сюда оси спрединга из района хребта Эгир. Батиметрия хребта сложна и в целом изучена достаточно слабо. Он представлен серией гряд и желобов, общая ширина которых заметно меняется: от порядка 40 км в южной части между Исландией и  $69^\circ$  с.ш. (зона разломов Спар) до 100–110 км в северной части. В пределах хребта наиболее заметное смещение его оси наблюдается по зоне разломов Спар, признаки других, незначительных смещений устанавливаются по детальным аэромагнитным данным [16]. Осевая рифтовая долина в южной части хребта отсутствует. В северной она представлена несколькими кулисообразно расположенными желобами, глубина которых относительно обрамляющих гребней гор достигает 500–700 м. Отмечаются секущие хребет желоба, простирание которых совпадает с простиранием восточно-гренландских фьордов. Неупорядоченность батиметрии хребта позволяет предположить, что формирование его как спрединговой структуры проходило при заметном влиянии тектонических процессов, имеющих место на ближайшей континентальной окраине. Интересно отметить, что асейсмичный участок хребта Колбейнсей расположен на траверзе фьорда Скорсбисунн. Подобная связь отмечена нами выше и для хребта Книповича.

### ГЛУБИНЫ ГИПОЦЕНТРОВ

Долгое время информация о глубинах гипоцентров арктических землетрясений была весьма слабой областью наших знаний. Для этого есть объективная причина, а именно, удаленность регистрирующих станций от сейсмоактивных зон. В подобной ситуации имеющиеся алгоритмы для массового определения положения очага землетрясения дают достаточно точные координаты эпицентра и весьма ненадежные данные о глубине гипоцентра. Поэтому для подавляющего числа срединно-океанических землетрясений имеются так называемые «приписанные» глубины, полученные на основе общегеологических представлений. В то же время существует способ определения глубины гипоцентра по фазе волны  $pP$ , отраженной от поверхности Земли в районе эпицентра. К сожалению, выделение этой волны представляет определенную трудность и может быть реализовано для незначительной части землетрясений. Тем не менее к настоящему времени накоплен некоторый материал по этим определениям, количество которых становится достаточным для предварительных выводов.

В континентальной части пояса на шельфе моря Лаптевых гипоцентры достаточно равномерно распределены в основном в диапазоне 6–24 км. Примерно такое

же равномерное распределение отмечается в переходной зоне к Евразийскому суббассейну, но на значительно более низком гипсометрическом уровне – 17–36 км. Сейсмоактивный слой здесь расположен глубже не только по сравнению с шельфом, но и по сравнению с Евразийским суббассейном. Возможны три причины, каждая из которых способна привести к такой ситуации:

- более погруженное положение источника напряжений (сейсмогенерирующего слоя). Получается, что кровля его (или подошва зоны накопления напряжений) залегает здесь на глубинах не менее 35–40 км;

- повышенная жесткость верхних 10–15 км консолидированной части коры, в результате чего разрядка напряжений происходит в более глубоких зонах. Возможно, что именно это обстоятельство препятствует образованию на шельфе моря Лаптевых единой генеральной границы плит и продвижению на юг Евразийского суббассейна;

- пониженная жесткость верхних 10–15 км консолидированной части коры, близкая к жесткости осадочного чехла, в результате чего в ней не происходит накопления напряжений, достаточных для возникновения сильных землетрясений.

В распределении гипоцентров вдоль океанической части Срединно-Арктического пояса наблюдается очевидная закономерность: при постоянной мощности сейсмоактивного слоя в 10–15 км глубина залегания его и, соответственно, кровли сейсмогенерирующего слоя закономерно уменьшается при движении от континентального склона моря Лаптевых в сторону Северной Атлантики. Эта закономерность нарушена лишь в зоне сочленения хребта Гаккеля со Шпицбергенской зоной разломов.

Так как положение сейсмогенерирующего слоя непосредственно связано с разогревом литосферы, можно говорить о том, что либо источник тепла приближается к поверхности в этом направлении, либо увеличивается его интенсивность.

Наибольший разогрев имеет место в Исландии и прилегающей к ней части хребта Рейкьянес, где кровля сейсмоактивного слоя залегает на глубинах 3–5 км. Не исключено, что именно с этим обстоятельством связаны другие особенности этого фрагмента срединно-океанических хребтов: отсутствие рифтовой долины и наличие трансформных разломов, косо ориентированных относительно оси хребта. О повышенном разогреве литосферы свидетельствует и более крутой наклон графика повторяемости землетрясений хребта Рейкьянес, т.е. меньшее количество сильных землетрясений относительно слабых.

### **ФОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ**

Для унификации данных по фокальным механизмам нами использованы только определения методом тензора момента центра (ТМЦ) [24], основанные на анализе всего пакета сейсмических волн.

Типы фокальных механизмов в целом соответствуют представлениям о геодинамике дивергентных границ плит. Подавляющее большинство определений по типично спрединговым хребтам дали субгоризонтальные оси растяжения и круто падающие оси сжатия. Особенно очевидно это на хребтах Мона, Гаккеля и Рейкьянес. Лишь одно определение на хребте Гаккеля и три на хребте Рейкьянес дали сдвиговый механизм трансформных разломов. По Шпицбергенской и Ян-Майенской зонам трансформных разломов закономерно получены сдвиговые механизмы.

Менее очевидная картина на хребтах Книповича и, особенно, Колбейнсей, и это хорошо коррелируется с отмеченными выше особенностями распределения эпицентров и предположением о заметном влиянии на геодинамику этих участков тектонических процессов неспрединговой природы.

Полигоном действия тектонических процессов различной природы является Исландия, где отмечается весь набор фокальных механизмов от нормально-сбросового до взбросового.

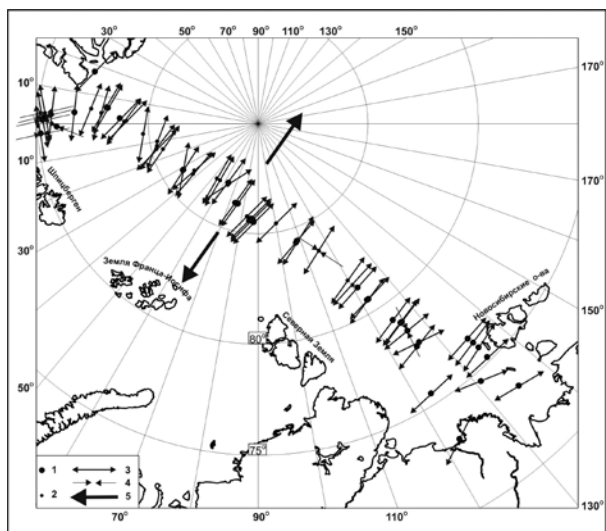


Рис. 3. Фокальные механизмы землетрясений Евразийского суббассейна и моря Лаптевых. Магнитуды и оси: 1 –  $\geq 5$ ; 2 – 4,0–4,9; 3 – растяжения; 4 – сжатия; 5 – направление движения плиты

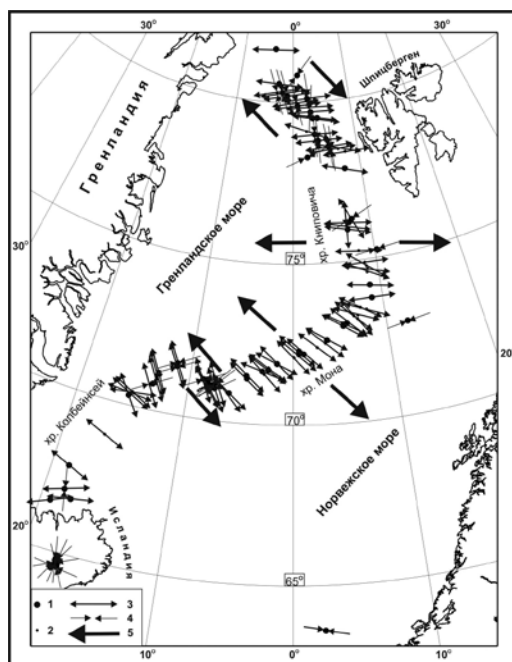


Рис. 4. Фокальные механизмы землетрясений Норвежско-Гренландского бассейна. Условные обозначения те же, что и на рис. 3

Весьма наглядна, по нашему мнению, картина положения осей растяжения, представленная на рис. 3–5. В Евразийском суббассейне они в целом субпараллельны между собой и субортогональны линии эпицентров, маркирующей границу Северо-Американской и Евразийской плит. На хребте Рейкьянес на-

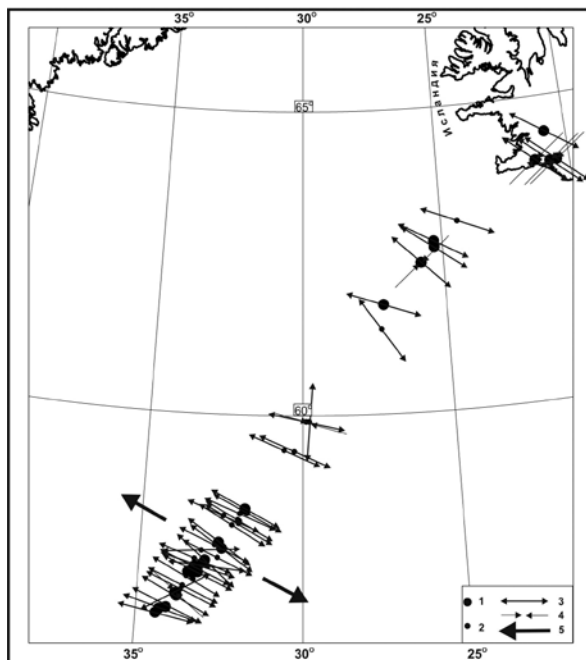


Рис. 5. Фокальные механизмы землетрясений хребта Рейкьянес  
Условные обозначения см. рис. 3

блюдается такая же упорядоченная картина, однако заметна неортогональность осей растяжения генеральной линии эпицентров. Более сложная ситуация имеет место в Норвежско-Гренландском бассейне. Направление движения плит здесь уверенно устанавливается ориентировкой подвижек вдоль Шпицбергенского и Ян-Майенского трансформных разломов. Видно, что это направление совпадает с генеральной ориентацией осей растяжения в очагах землетрясений хребта Мона. В то же время последнее неортогонально генеральной линии эпицентров землетрясений. Кроме того, генеральное направление осей растяжения в очагах землетрясений хребта Книповича требует широтно ориентированного направления движения плит, составляющего угол примерно в  $45^\circ$  по отношению к фактически существующему. Таким образом, литосфера Гренландского моря подвержена действию разнонаправленных сил, которые, несомненно, должны приводить к накоплению напряжений и разрядке их в ослабленных зонах. Именно этим обстоятельством и можно объяснить тот факт, что в пределах абиссальной котловины Гренландского моря, в отличие от других спрединговых абисселей, происходят довольно частые землетрясения с магнитудами свыше 5,0. То же самое можно сказать и о районе с противоположной стороны межплитной границы – котловина Норвежского моря также характеризуется большим количеством землетрясений, особенно в районе разлома Сенья.

Определения фокальных механизмов методом ТМЦ позволяют оценить степень соответствия очага землетрясения модели двойной пары сил без момента (*double-couple*). Показателем этого является величина  $\varepsilon$ -value, равная отношению модулей промежуточного  $N_{val}$  и одного из главных  $T_{val}$  или  $P_{val}$  напряжений. Соответствие считается хорошим, если  $\varepsilon$ -value не превышает 0,3, при  $\varepsilon = 0,3-0,5$  модель считается близкой к линейному диполю, что предполагает не плоскую, а объемную фор-

му очага. В работе [26] на основе анализа серии землетрясений на юге Исландии в районе действующего вулкана Бардарбунга сделан вывод о том, что землетрясения с большим  $\epsilon$ -value являются вулканическими. Представилось интересным рассмотреть этот показатель по всем фокальным решениям землетрясений Срединно-Арктического пояса. Как выяснилось, землетрясения с большим  $\epsilon$ -value имеют место во всех фрагментах сейсмического пояса, кроме Шпицбергенской зоны разломов. Последнее обстоятельство находится в хорошем соответствии с теоретическими представлениями о природе подвижек в трансформных разломах. На хребте Гаккеля наличие вулканических излияний можно предполагать практически на всем его протяжении, включая и зону сочленения с Лаптевским шельфом. В центральной части хребта в пользу этого говорит и сам факт возникновения в 1999 г. роя землетрясений, которые, как показывает практика наблюдений на суше, обычно связаны с вулканическими излияниями. В марте 2000 г. исследователи Гавайского университета провели сонарные наблюдения с подводной лодки (SCICEX program) и обнаружили в районе роя наблюдений свежие лавовые потоки [25].

Повышенные значения  $\epsilon$ -value получены также в зоне сочленения хребта Мона с хребтом Книповича и Ян-Майенской зоной разломов, в самой Ян-Майенской зоне и на участке ее сочленения с хребтом Колбейнсей, на южном замыкании хребта Колбейнсей и в Исландии, в упоминавшемся уже районе вулкана Бардарбунга. На хребте Рейкьянес они отмечены в основном в его центральной части и на юге, в зоне, примыкающей к разлому Чарли Гиббса. Одно землетрясение с  $\epsilon$ -value 0,41 зарегистрировано в море Лаптевых в восточной полосе эпицентров.

Интересно отметить, что северная часть хребта Рейкьянес, характеризующаяся по геологическим и геоморфологическим данным высокой вулканической активностью, по параметру  $\epsilon$ -value не выделяется. Точно так же землетрясение 7 января 1985 г. на севере о. Ян-Майен, происшедшее в период извержения вулкана Бееренберг (6–9 января 1985 г.), имело  $\epsilon$ -value, равное 0,06 [17].

Наличие тектонических и вулканических землетрясений свидетельствует о том, что раздвижение плит происходит в результате действия двух процессов. Первый – растаскивание плит расходящимися конвективными потоками, дополненное затягиванием плит в зонах субдукции. В этом случае магматические излияния поступают в расколы, образовавшиеся после тектонических землетрясений. Второй процесс – расталкивание плит в результате внедрения магматических излияний. Это внедрение и генерирует вулканические землетрясения. С учетом явно большего количества тектонических землетрясений первый процесс следует считать преобладающим.

Каковы же перспективы сейсмологических исследований ВНИИОкеангеология?

Реально оценивая существующую ситуацию, можно утверждать, что возобновления экспедиционных сейсмологических наблюдений не будет. Для этого нет ни материальных возможностей, ни необходимого штата подготовленных сотрудников. Как и 20 лет назад, единственным сейсмологом в институте остается Г.П.Аветисов.

Будет продолжена научно-исследовательская деятельность, базирующаяся на фактическом материале, заложенном в постоянно пополняемый банк арктических сейсмологических данных. Последующий сейсмологический мониторинг, не прекращающийся никогда, позволит подтвердить, уточнить или опровергнуть выявленные закономерности, обнаружить новые. Сейсмологические данные использовались и будут использоваться при составлении геологических листов на шельфовые моря Российской Арктики, их побережья и острова, при решении проблемы внешней границы континентального шельфа России в Арктике и других геологических задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисов Г.П.* Сейсмическое районирование территории архипелага Земля Франца-Иосифа // Геофизические методы разведки в Арктике. Л.: Изд-во НИИГА, 1971. Вып. 6. С. 128–134.
2. *Аветисов Г.П., Голубков В.С.* Тектоно-сейсмическое районирование Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана и сопредельных акваторий // Геология и полезные ископаемые севера Сибирской платформы. Л.: Изд-во НИИГА, 1971. С. 66–73.
3. *Аветисов Г.П., Булин Н.К.* Глубинное геологическое строение архипелага Земля Франца-Иосифа по сейсмологическим данным // Геофизические методы разведки в Арктике. Л.: Изд-во НИИГА, 1974. Вып. 9. С. 26–32.
4. *Аветисов Г.П.* Глубинная структура Новосибирских островов и прилегающих акваторий по сейсмологическим данным // Советская геология. 1982. № 11. С. 113–122.
5. *Аветисов Г.П.* Сейсмичность моря Лаптевых и ее связь с сейсмичностью Евразийского бассейна // Тектоника Арктики. Л.: Изд-во НИИГА, 1975. Вып. 1. С. 31–36.
6. *Аветисов Г.П., Голубков В.С.* Глубинное строение центральной части Норильского рудного района по данным МОВЗ-ГСЗ // Советская геология. 1984. № 10. С. 86–94.
7. *Аветисов Г.П.* Гипоцентрия и фокальные механизмы землетрясений дельты р. Лены и ее обрамления // Вулканология и сейсмология. 1991. № 6. С. 59–69.
8. *Аветисов Г.П., Гусева Ю.Б.* Глубинное строение района дельты Лены по сейсмологическим данным // Советская геология. 1991. № 4. С. 73–80.
9. *Аветисов Г.П., Ашихмина Е.А., Гусева Ю.Б.* Строение Усть-Ленского прогиба в южной части моря Лаптевых по данным КМПВ // Отечественная геология. 1994. № 1. С. 56–61.
10. *Аветисов Г.П.* Геодинамика сейсмоактивных зон Арктического региона // Отечественная геология. 1993. № 10. С. 52–62.
11. *Аветисов Г.П.* Некоторые вопросы динамики литосферы моря Лаптевых // Физика Земли. 1993. № 5. С. 28–38.
12. *Аветисов Г.П., Винник А.А.* Банк арктических сейсмологических данных // Физика Земли. 1995. № 3. С. 78–83.
13. *Аветисов Г.П.* Сейсмоактивные зоны Арктики. СПб.: Изд-во ВНИИОГ, 1996. 183 с.
14. *Аветисов Г.П.* О границе литосферных плит на шельфе моря Лаптевых // ДАН. 2002. Т. 385. № 6. С. 793–796.
15. *Аветисов Г.П., Зинченко А.Г., Мусатов Е.Е., Пискарев А.Л.* Сейсмическое районирование Арктического региона // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология. СПб.: Изд-во ВНИИОГ, 2002. С. 162–175.
16. Геофизические характеристики земной коры Атлантического океана / Под ред. И.С.Граммберга. Л.: Недра, 1985. 247 с.
17. *Зобин В.М.* О природе очагов сильных вулканических землетрясений на острове Ян-Майен // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 40–49.
18. *Парфенов Л.М., Козьмин Б.М. и др.* Геодинамические модели сейсмических поясов Якутии. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1987. 48 с.
19. *Avetisov G.P., Piskarev A.L.* Deep structure of western Yakutia based on data on converted earthquakes waves // Intern. Geol. Review. 1980. Vol. 22. № 11. С. 1268–1274.
20. *Avetisov G.P.* Some Aspects of Lithospheric Dynamics of Laptev Sea // Physics of Solid Earth 1993b. Vol. 29. № 5. P. 402–412.
21. *Avetisov G.P., Vinnik A.A.* Bank of Arctic seismological data (English Translation) // Physics of the Solid Earth. 1995. Vol. 31. № 3. P. 262–267.
22. *Avetisov G.P.* Geodynamics of the zone of continental continuation of Mid-Arctic earthquakes belt (Laptev Sea) // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1999. Vol. 114. № 1–2. P. 59–70.
23. *Cook D., Fujita K., VcMulle G.* Present-day plate interaction in northeast Asia; North American, Eurasian, and Okhotsk plates // J. of Geodynamics. 1986. Vol. 6. P. 33–51.

24. *Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. P. 2825–2852.
25. *Muller C., Jokat W.* Seismic evidence for volcanic activity discovered in Central Arctic // *Eos, Transactions, American Geophysical Union.* 2000. Vol. 81. № 24. P. 265.
26. *Nettles M., Ekstrom G.* Faulting mechanism of anomalous earthquakes near Bardarbunga Volcano, Iceland // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 17,973–17,983.

*G.P.AVETISOV*

**SEISMOLOGICAL INVESTIGATIONS  
OF NIIGA-VNIIOKEANGEOLIA IN THE ARCTIC:  
HISTORY OF STUDY, PROGRESS, PROSPECT**

*Information about seismological investigations of NIIGA-VNIIOkeangeologia in the Arctic is presented in the article. Expeditionary observations were begun in 1968 and carried out in the Frantz Josef Land, New Siberian Islands, Western Yakutiya, Norilsk's Region, and Lena's River Delta. Some features of deep geological structure in the areas of study are discovered. Digital bank of cumulative seismological data in the Arctic is compiled. Hypocenters and focal mechanisms of earthquakes in the Arctic are studied based on compilation and analysis of all available seismological data. Some new ideas about present-day geodynamics are developed.*

*Key words:* Arctic, earthquake, data bank, focal mechanisms, geodynamics, geological structure.