

УДК 551.462.62

Ю.А. Зарайская¹, В.В. Фроль²**СЕЙСМИЧНОСТЬ ХРЕБТА РЕЙКЪЯНЕС И ОСОБЕННОСТИ ЕГО МОРФОЛОГИИ³**

Проанализированы данные о землетрясениях в пределах хр. Рейкьянес за период 1977—2009 гг. Все события разделены по магнитуде и нанесены на батиметрическую карту хребта. Проведен анализ положения и характера очагов землетрясений вдоль оси хребта с целью определения пространственной и глубинной структуры их распределения в зависимости от морфологических особенностей строения хребта. По геоморфологическим и сейсмическим данным хребет разделяется на три района с отчетливыми границами в виде поперечных разломов. Характер сейсмичности вдоль простирания хребта изменяется в полном соответствии с изменениями в строении рельефа и служит индикатором интенсивности тектонических движений.

Ключевые слова: хребет Рейкьянес, сейсмичность, геоморфология, землетрясения.

Введение. Хребет Рейкьянес расположен между зоной разломов Чарли Гиббс и о. Исландия. Общая протяженность хребта около 1000 км, генеральное простирание — юго-запад — северо-восток. Скорость спрединга, определяемая по линейным магнитным аномалиям, составляет 1,8 см/год. Мощность океанической коры изменяется от 30 км в районе северного сегмента, сочленяющегося с Исландией, до 7 км в районе южного сегмента [6]. Возраст хребта около 55 млн лет.

Морфология хр. Рейкьянес вдоль его простирания от о. Исландия на севере до зоны разломов Чарли Гиббс на юге существенно меняется, что выражено в последовательной смене форм рельефа — от простого валообразного поднятия фундамента до типично рифтовых форм [3—5, 7]. В целом эти изменения можно определить как переход от форм преимущественно вулканического генезиса вблизи исландского плюма к формам в основном разломного происхождения, связанным со структурой хребта.

Постановка проблемы. В соответствии с предположением, что индикатором таких изменений в строении рельефа должны служить изменения сейсмической обстановки в пределах отдельных звеньев хребта, необходимо проследить характер изменения морфологии хребта вдоль его простирания и приуроченность сейсмических событий к основным морфологическим структурам.

Материалы и методы исследований. Проанализированы данные о землетрясениях в пределах хр. Рейкьянес за период с 1963 по 2009 г. включительно. Сведения взяты с сайта Advanced national seismic system [8]. Визуальный анализ приуроченности сейсмических событий к морфологическим структурам выполнен в программной среде ArcGIS, предназначенной для работы с цифровыми моделями рельефа. Эпицентры землетрясений были совмещены с батиметрической

картой хр. Рейкьянес [9]. Исходная выборка содержала 2625 событий, зарегистрированных с 1972 по 2009 г. Затем отобрали данные, удовлетворяющие задачам исследования. Отбор проводился на основе аналогичной работы О. Энгена с соавторами [10]. Конечная выборка содержала 1309 событий за 1972—2009 гг. При отборе использован следующий алгоритм:

события группируются по времени регистрации разными станциями для определения повторов, повторно зарегистрированные события удаляются;

проводится отбор событий с магнитудой >3 , зарегистрированных больше чем 12 станциями, чтобы средняя ошибка определения координат составляла не больше 10 км.

Использованы систематические данные (магнитуда) $m_b > 4,0$. Подобные данные регулярно регистрируются с 1955 г. благодаря организации сетей сейсмических станций СССР и США. С 1964 г. все данные обрабатывают по единой системе Международным сейсмологическим центром (МСЦ). Для всех событий значения магнитуды оцениваются по объемным волнам с периодом около 1 с, а также (после 1970 г.) по поверхностным волнам с периодом $T = 20$ с (M_s) [1, 2].

Вторым критерием отбора данных служила глубина гипоцентров землетрясений. Подавляющее большинство событий сфокусировано в первых 10 км от поверхности. Однако до 1977 г. преобладающая глубина составляла 33 км, это обстоятельство объясняется аппаратными различиями сейсмостанций. Чтобы соблюсти однородность выборки, землетрясения, зарегистрированные до 1977 г., были исключены из исследования. Также исключались данные с неопределенной магнитудой. В конечной выборке осталось 1118 землетрясений с известными датой, временем, координатами, глубиной и магнитудой. Затем все данные были разделены по магнитуде: очень слабые ($m_b = 3\div 3,9$; 57 событий), слабые ($4\div 4,4$; 522 события),

¹ Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники дна океанов, стажер-исследователь; *e-mail*: geozar@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геоморфологии и палеогеографии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: vladfroll@mail.ru

³ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-05-00196 а).

средние (4,5±4,9; 483 события) и сильные (5±6; 56 событий).

Так как удаленное положение сейсмических станций от очагов землетрясений не позволяет точно определить глубину, то событию присваивается тот или иной глубинный класс в соответствии с геодинамической ситуацией региона [1]. Таким образом, распределение землетрясений по глубине очагов нами не рассматривалось.

Эпицентры землетрясений были нанесены на батиметрическую карту хр. Рейкьянес (рис. 1). Анализировалось распределение очагов землетрясений вдоль оси хребта с целью определить пространственную структуру их распределения в связи с морфологическими особенностями строения хребта. Проведенный пространственно-временной анализ позволил выделить зоны сгущения сейсмической активности вдоль простирания хр. Рейкьянес (рис. 2, 3). Зоны сгущения имеют как пространственные различия в характере распределения сейсмической активности, так и магнитудно-частотные.

Результаты исследований и их обсуждение. По строению рельефа хр. Рейкьянес можно разделить на три отличающихся по морфологии района — северный, центральный и южный [7].

Северный район (севернее 62°30' с.ш.). Своеобразие этого отрезка хребта заключается в том, что он заложен на островном шельфе Исландии и в силу этого резко отличается от южных участков, развитых на океанической коре. В рельефе хребет выделяется в виде слабого асимметричного вздутия фундамента. Гребневая зона геоморфологически выражена очень плохо, почти не выделяется на фоне общего пологого поднятия. Западная граница гребневой зоны отмечается в виде небольшого перегиба в рельефе, восточная — более четко в виде сбросового уступа. Фланговые зоны практически не выражены в рельефе ровного базальтового плато, на котором заложен хребет. Рифтовая долина здесь отсутствует. Однако вдоль оси хребта протягивается очень узкая зона, отмеченная положительной магнитной аномалией с высокой амплитудой, аналогичной осевым аномалиям срединных хребтов.

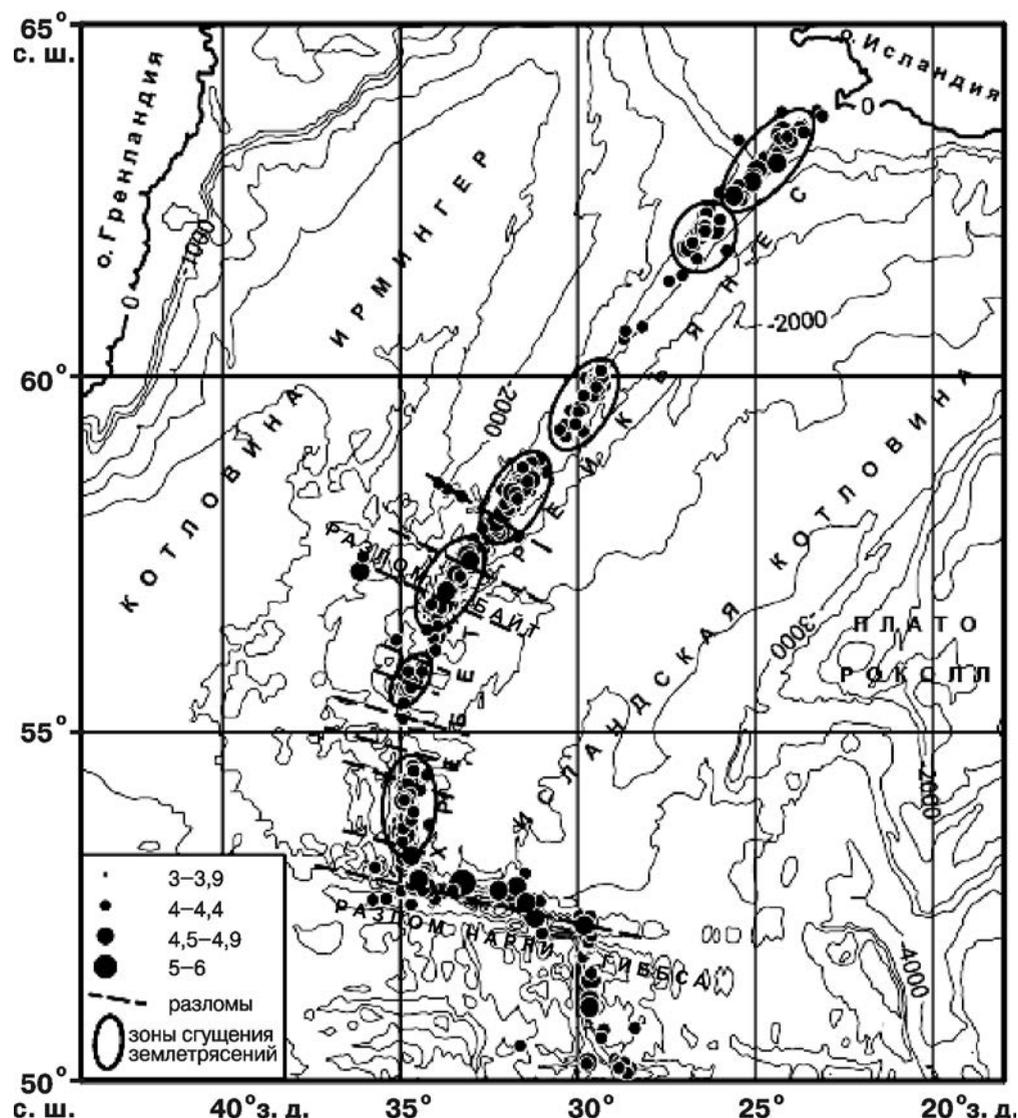


Рис. 1. Распределение эпицентров землетрясений на хр. Рейкьянес

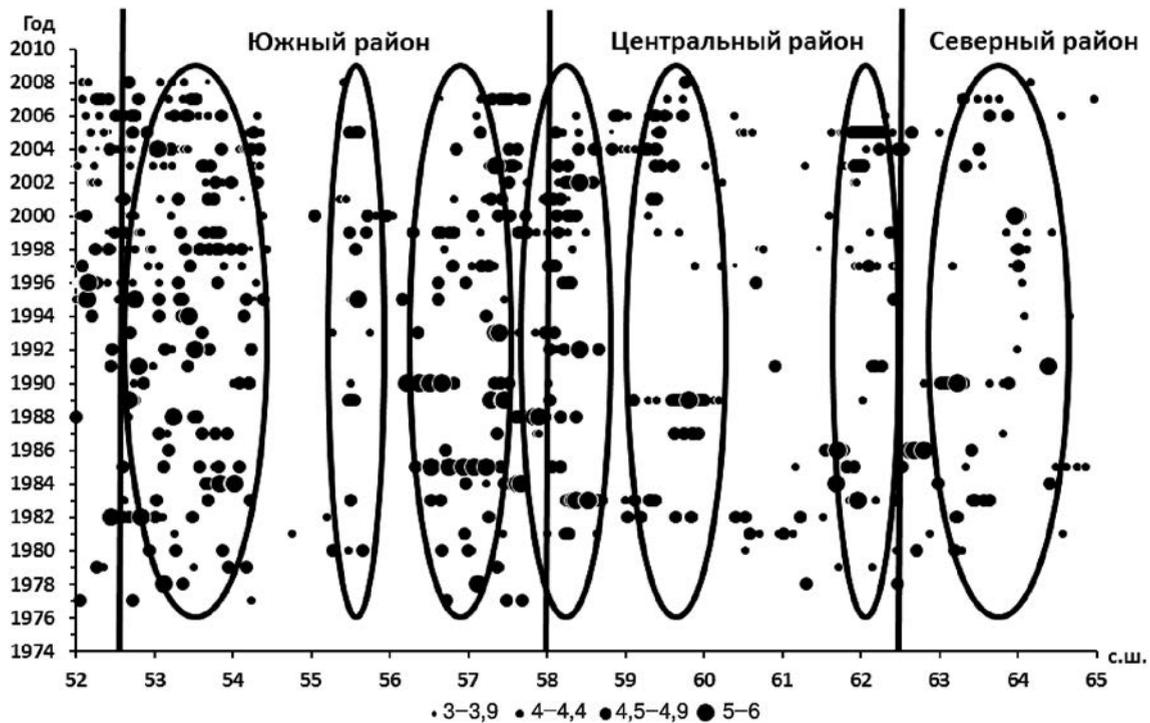


Рис. 2. Пространственно-временное распределение сейсмической активности вдоль хр. Рейкьянес. Размер кружка — магнитуда землетрясения

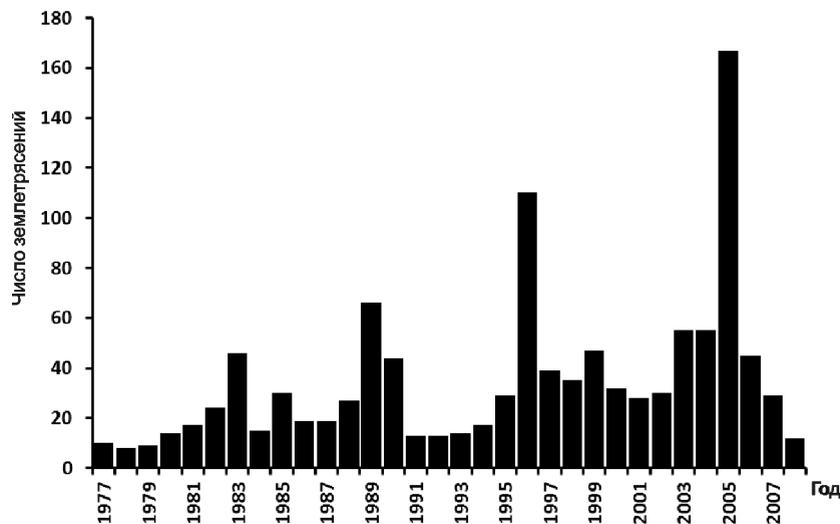


Рис. 3. Распределение числа землетрясений на хр. Рейкьянес по годам

В рельефе эта зона представлена небольшими холмами с относительной высотой 20–40 м и впадинами. Осевое положение этой структуры на гребне хребта, а также схожесть ее рельефа и магнитных аномалий с таковыми в более развитых осевых структурах южных частей хребта заставляют охарактеризовать ее как примитивную рифтовую долину в начальной стадии развития.

В северном районе выделяется одна зона, занимающая центральное положение. За период наблюдения здесь зарегистрировано 74 события, из которых к группам слабых и средних землетрясений относятся 32 и

34 события соответственно. Здесь также зарегистрировано одно очень слабое землетрясение и 7 сильных.

Центральный район ($62^{\circ}30'$ – 58° с.ш.) имеет более сложную морфологию. Основная черта рельефа хребта — четкий центральный горстовый выступ гребня с относительной высотой уступа 750–800 м над склоновой зоной, его ширина около 50–60 км. Рифтовая зона занимает осевую часть гребневого выступа. В среднем ее ширина составляет 30 км. Характерно отсутствие выраженной в рельефе рифтовой долины. Сама рифтовая зона выделяется в виде полосы довольно расчлененного рельефа по оси гребня. Поднятия

в рельефе выражены в виде вытянутых вдоль хребта гряд высотой 200—300 м относительно дна разделяющих их впадин. Последние представляют собой трещины, возникшие в результате растяжения в осевой зоне хребта, своего рода зачатки рифтовых долин. Южнее интенсивность расчленения гребня увеличивается, но общий облик рельефа для этого участка хр. Рейкьянес остается неизменным.

Склоны хребта по обе стороны от осевого выступа морфологически представлены рядом блоков, последовательно опущенных на разную глубину, увеличивающуюся пропорционально удалению от оси хребта. Ширина и общее число блоков, выделяемых в пределах склоновых частей хр. Рейкьянес, варьируют вдоль него. В целом строение склонов постепенно усложняется в направлении с севера на юг вдоль хребта. Широкие ступенеобразные склоны южнее сменяются более дифференцированной “клавиатурой” из опущенных блоков с более интенсивным расчленением рельефа.

Центральный район характеризуется разнородностью как пространственной, так и временной структуры проявления сейсмической активности. В районе 61° с.ш. наблюдается обширная слабосейсмичная зона. Зоны сгущения землетрясений выделяются в районе 62° с.ш. и между 59 и 60° с.ш. В зоне 62° с.ш. всего зарегистрировано 190 событий, 132 из которых произошли в 2005 г., предположительно при извержении подводного вулкана. Землетрясения с магнитудой 3,8—5,2 происходили в течение нескольких месяцев. В зоне между 59 и 60° с.ш. в 1989 г. была зарегистрирована последовательность землетрясений с основным событием с магнитудой 5,4. После 1989 г. сейсмическая активность региона восстановилась только в 1996 г. и более или менее равномерно, с отдельными всплесками продолжалась до конца наблюдаемого периода.

Следующая зона сгущения землетрясений расположена на границе южного и центрального районов. В рассматриваемой зоне заметно превалируют события средней группы (79 событий со средней магнитудой и 34 со слабой), а также зарегистрировано 18 сильных событий. Землетрясения распределены равномерно в течение всего периода наблюдений, при этом сильным землетрясениям сопутствовали серии форшоков и афтершоков.

Южный район (58° — $52^\circ 30'$ с.ш.), его структурными границами служат разломы Байт на севере и Чарли Гиббс на юге. Впервые рифтовая долина в гребневой части хребта появляется около 58° с.ш. в виде неглубокого и плохо выраженного в рельефе ущелья с относительной глубиной 370 м. По направлению к югу размеры этой долины быстро увеличиваются, она превращается в хорошо развитую типичную рифтовую долину со сложным вторичным расчленением. Относительная глубина ее достигает 1700 м. В этом же направлении усиливается и общая раздробленность хребта. Смена типов рельефа при переходе от центрального к южному району представляется очень

резкой. Переход от примитивного блокового недифференцированного рельефа без рифтовой долины в северной части хребта к сложнорасчлененному типу рельефа в его южной части, судя по очертаниям изобат, сопровождается общим опусканием всего южного блока хребта.

Сильнорасчлененный тип рельефа рифтовой зоны свойствен всей южной части хр. Рейкьянес. Однако по направлению к зоне разломов Чарли Гиббс общая раздробленность рельефа рифтовой зоны хребта усиливается. Увеличение вертикальной расчлененности рельефа происходит в основном за счет постепенного углубления рифтовых долин по направлению к разломам. В этом же направлении повышается и ширина рифтовых долин. Углубление и расширение осевых долин сопровождается общим увеличением ширины рифтовой зоны, что свидетельствует об интенсивных тектонических деформациях вблизи пересечения рифтов и зон поперечных разломов. Обычно четкая осевая долина сопровождается в гребневой зоне серией узких долин-трещин с относительной глубиной до 800—1000 м или заменяется широким U-образным разрывом между двумя поднятыми рифтовыми блоками с рядом параллельных поднятий и долин. Рельеф фланговых зон при переходе к южному району хр. Рейкьянес изменяется в меньшей степени, нежели рельеф рифтовой зоны. Вертикальное расчленение рельефа склонов (особенно западного) увеличивается в южном районе по сравнению с более “мелким” расчленением в северном районе хребта.

При общем сложном строении фундамента в строении рельефа южной части хр. Рейкьянес значительную роль начинают играть поперечные структуры, отсутствующие в северном районе хребта. К югу от 57° с.ш. по данным непрерывного сейсмопрофилеирования отмечено наличие 12 поперечных разломных долин в фундаменте и отсутствие подобных структур к северу от этой широты [11]. Наиболее крупные разломы отражены на гравиметрической карте в низких значениях аномалий силы тяжести в свободном воздухе [6]. Простирающиеся поперечные разломы параллельно простиранию крупнейшей зоны разломов Чарли Гиббс, также хорошо выражены в аномалиях в свободном воздухе. Таким образом, южная часть хр. Рейкьянес представляет собой цепочку рифтовых сегментов хребта, разделенных поперечными разломами. По положению этот район соответствует месту изгиба и изменения простирания хребта. Строение рельефа южного района хр. Рейкьянес ближе к такому у развитого рифтового Центрально-Атлантического хребта, чем у северных частей, находящихся в начальной стадии рифтогенеза.

Отмеченные выше региональные различия в строении рельефа хр. Рейкьянес подтверждаются также геофизическими данными. Так, в структуре магнитного поля хр. Рейкьянес отчетливо выделяются две зоны — осевая зона шириной около 200 км с коротковолновыми аномалиями высокой амплитуды и фланговая

с аномалиями большей длины волны и меньшей амплитуды [6]. Гребневая зона включает аномалии от N1 до N5. Наиболее хорошо выраженная аномалия N1 шириной около 40 км и амплитудой до +300 нТл наблюдается вблизи оси гребня хребта. По обе стороны от нее выделяется до шести положительных линейных аномалий, разделенных широкими полосами отрицательных аномалий. Несмотря на отмеченные выше различия в строении рифтовой зоны отдельных участков хр. Рейкьянес, т.е. наличие или отсутствие рифтовой долины, осевая аномалия прослеживается по всей длине хребта вплоть до побережья Исландии, где она продолжается в аномалиях, связанных с поясом вулканитов четвертичного возраста. Фланговые аномалии резко отделяются от осевой и расположены симметрично от оси по амплитуде и длине волн. Такая структура аномалий сохраняется вдоль хребта от 62° с.ш. примерно до 58° с.ш., т.е. в пределах центрального района хр. Рейкьянес. В непосредственной близости от Исландии, севернее 62°30' с.ш., амплитуда всех линейных аномалий над хребтом уменьшается в несколько раз. Наиболее четко выделяются только аномалии N1 и N5, которые, возможно, постепенно затухают вблизи побережья Исландии. Для южного района, напротив, характерна осевая аномалия с амплитудой почти в 2 раза меньше, чем у центральной части хребта. Аномалии на западном фланге в целом имеют большую амплитуду и менее регулярны, чем на восточном фланге. Такая неравномерность магнитного поля свидетельствует о более высокой тектонической активности, нарушающей регулярную структуру магнитного поля в южной части хребта, особенно в пределах его западного склона. Эти данные хорошо согласуются с приведенным выше районированием по рельефу.

В южном районе выделяются три зоны сгущения очагов землетрясений. Центральная часть района слабосейсмична, небольшая зона сгущения эпицентров расположена в районе 55°30' с.ш. и приурочена к небольшим разломам, пересекающим рифтовую долину хребта. Основные зоны сейсмичности расположены ближе к границам района, где находятся основные разломные зоны Байт и Чарли Гиббс. На северной границе района зарегистрировано 116 событий, из них 3 очень слабых, 24 слабых, 61 среднее и 28 сильных. В районе южной границы района зарегистрировано 204 события, из которых 5 очень слабых, 74 слабых, 91 среднее и 34 сильных. Таким образом, наблюдается увеличение как общего числа землетрясений к югу вдоль простирания хребта, так и их силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисов Г.П.* О глубинах гипоцентров землетрясений срединно-арктического сейсмического пояса // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 4. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 90—100.

Выводы:

— выявлена вполне отчетливая связь между характером рельефа и сейсмичностью хр. Рейкьянес. Подавляющее большинство землетрясений имеет слабую (4÷4,4) и среднюю (4,5÷4,9) магнитуду, что соответствует характеру разгрузки напряжений в зоне срединно-океанических хребтов. Максимальные значения магнитуды не превышают 5÷6 и встречаются крайне редко;

— выделены районы с разной тектонической и сейсмической активностью. Большинство очагов землетрясений расположено в пределах рифтовой зоны хребта, лишь единичные эпицентры отмечены на флангах. Выделены зоны сгущения сейсмической активности вдоль простирания хр. Рейкьянес. Зоны сгущения имеют как пространственные различия в характере распределения сейсмической активности, так и магнитудно-частотные. Отмечается тяготение эпицентров к склоновым районам рифтовой зоны хребта. В северном районе и северной части центрального района эпицентры приурочены к восточному склону, в южном районе хребта эпицентры тяготеют к западным склонам рифтовой зоны и к северной части зоны разломов Чарли Гиббс;

— установлено, что с севера на юг по простиранию хр. Рейкьянес его сейсмичность увеличивается в несколько раз, соответственно изменяется и характер сейсмичности от одиночных землетрясений на севере к группам землетрясений на юге. Увеличивается и магнитуда землетрясений, особенно в местах пересечения рифтовой зоны хребта с поперечными разломами. Это соответствует постепенному переходу к сегментам хребта с более расчлененным рельефом. Резкое усиление сейсмичности в южной части хр. Рейкьянес свидетельствует об усилении тектонической активности и блоковых движений в пределах этого участка со сложным рельефом. На северном участке хребта, напротив, отмечена сравнительно слабая сейсмическая и тектоническая активность, как следствие здесь ровный ненарушенный фундамент. Причина таких изменений заключается в постепенном переходе от мощной коры в центре Исландского плюма к более "нормальной" океанической коре на удалении от него. В этом направлении роль площадного вулканизма ослабевает, постепенно сменяясь разломной тектоникой. Разломы, контролируемые рифтовые образования, легко вскрывают тонкую океаническую кору хребта, рельеф становится сильно расчлененным блоковым с глубокими рифтовыми долинами и соответственно усиливается сейсмичность.

2. *Болдырев С.А.* Сейсмогеодинамика Срединно-Атлантического хребта. М.: Национальный геофизический комитет РФ, 1998. 126 с.

3. *Ильин А.В.* Геоморфология дна Атлантического океана. М.: Наука, 1976. 231 с.

4. Исландия и Срединно-океанический хребет // Строе-ние дна океана / Отв. ред. В.В. Белоусов, Г.Б. Удинцев. М.: Наука, 1977. 204 с.
5. *Котенев Б.Н., Назимов В.В., Рвачев В.Д.* Геоморфология хребта Рейкьянес // Тр. ВНИРО. 1974. Т. 98. С. 98—109.
6. Рифтовая зона хребта Рейкьянес / Отв. ред. А.П. Лисицын, Л.П. Зоненшайн. М.: Наука, 1990. 236 с.
7. *Фроль В.В.* Геоморфология рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта. М.: Наука, 1987. 93 с.
8. Advanced national seismic system. URL: <http://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html> (дата обращения: 10.12.2012).
9. Digital atlas. The general bathymetric chart of the oceans (GEBCO). NOAA. 2003.
10. *Engen O., Eldholm O., Bungum H.* The Arctic plate boundary // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. N B2. P. 2007—2035.
11. *Keeton J.A., Searle R.C., Peirce C.* et al. Bathymetry of the Reykjanes Ridge // Mar. Geophys. Res. 1996. Vol. 19. N 1. P. 55—64.

Поступила в редакцию
08.11.2012

Yu.A. Zaraiskaya, V.V. Frol

SEISMIC ACTIVITY OF THE REYKJANES RIDGE AND ITS MORPHOLOGICAL FEATURES

Data on the earthquakes within the Reykjanes Ridge during 1997—2009 are analyzed. All events were grouped according to their magnitudes and shown on the bathymetric map of the ridge. The location and character of the focuses along the axis of the ridge were analyzed and the spatial and depth patterns of their distribution were determined in relation to the morphological features of the ridge structure. According to geomorphologic and seismic data the ridge could be divided into three segments with distinct boundaries (transverse faults). Seismic activity along the ridge follows the changes of its relief and is a good indicator of the intensity of tectonic movements.

Key words: the Reykjanes Ridge, seismic activity, geomorphology, earthquakes.