

СЕГМЕНТИРОВАНИЕ АЛЕУТСКОГО РЕГИОНА ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

К. Ю. Силкин¹, С. Н. Родина²

¹ Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

² Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия

Поступила в редакцию 13 марта 2017 г.

Аннотация: необходимость уточнить известное из публикаций сегментирование Алеутского сейсмически активного региона возникла в связи с решением задачи поиска причинно-следственных связей в потоке сейсмических событий. Очевидно, что для этого требуется брать в рассмотрение только те участки региона, в которых такие связи сохраняются. В связи с этим была поставлена цель уточнить и развить доступную из публикаций схему сегментирования изучаемого региона на однородные по сеймотектоническим характеристикам участки. Каталог алеутских землетрясений с 1916 года использовался для расчёта распределения пространственной плотности эпицентров и статистических характеристик глубин гипоцентров. Сегментирование производилось исходя из представлений об иерархической многоуровневой организации литосферы, чтобы получить возможность учитывать как сильные, так и средние события. В результате впервые была разработана новая иерархическая трёхуровневая система сегментирования Алеутского региона, ограниченного меридианами от 165° в.д. до 155° з.д. Она может быть полезна при среднесрочном прогнозировании землетрясений. Тем не менее, система требует дальнейшего уточнения с учётом энергетического представления сейсмического процесса.

Ключевые слова: Алеутская дуга, сейсмичность, сегментирование, плотность эпицентров.

SEGMENTATION OF THE ALEUTIAN REGION ON THE BASIS OF SEISMOLOGICAL DATA

Abstract: the goal to specify the segmentation of the Aleutian seismically active region, known from publications, was formulated. This goal is associated with solution of the problem of causal relationships in the seismic process detecting. For this purpose it is required to take only those sites of the region in which such relationships remain in consideration. Therefore the object to specify and develop the schemes of segmentation of the studied region published earlier was set. The new system of segmentation has to divide the territory into sites, uniform in seismotectonic characteristics. The catalog of the Aleutian earthquakes since 1916 was used for calculation of epicenters spatial density and hypocenters depths statistical characteristics. The segmentation was made proceeding from ideas of the hierarchical multilevel organization of lithosphere to have an opportunity to consider both strong, and average events. As a result the new hierarchical three-level system of segmentation of the Aleutian region limited to meridians from 165 ° EL to 155 ° WL was for the first time developed. This system can be useful at medium-term forecasting of earthquakes. Nevertheless, the system demands further specification taking into account power representation of seismic process.

Keywords: Aleutian arc, seismicity, segmentation, density of epicenters.

Введение

Такая крупная тектоническая структура как Алеутская островная дуга (рис. 1) не является единым блоком литосферы, в котором сейсмический процесс характеризуется детерминированными причинно-следственными связями во всех участках. Даже самые сильные землетрясения затрагивают только часть этой территории. Следовательно, при решении задачи прогноза землетрясений необходимо учитывать такое разделение.

Анализ публикаций позволил сформировать убеждение о необходимости продолжить изучать данную

проблему. Было осуществлено исследование пространственного распределения многолетней сейсмической активности с целью выявления сведений о проявляющейся в ней делимости литосферы. Потребовалось маркировать такие достаточно обособленные участки, внутри которых сейсмические события происходит относительно обособленно от соседних. Сегменты должны иметь иерархическую многоуровневую организацию, чтобы удовлетворять представлениям о фрактальности строения литосферы и давать возможность учитывать влияние как сильных, так и средних событий [1]. Предполагается, что крупные

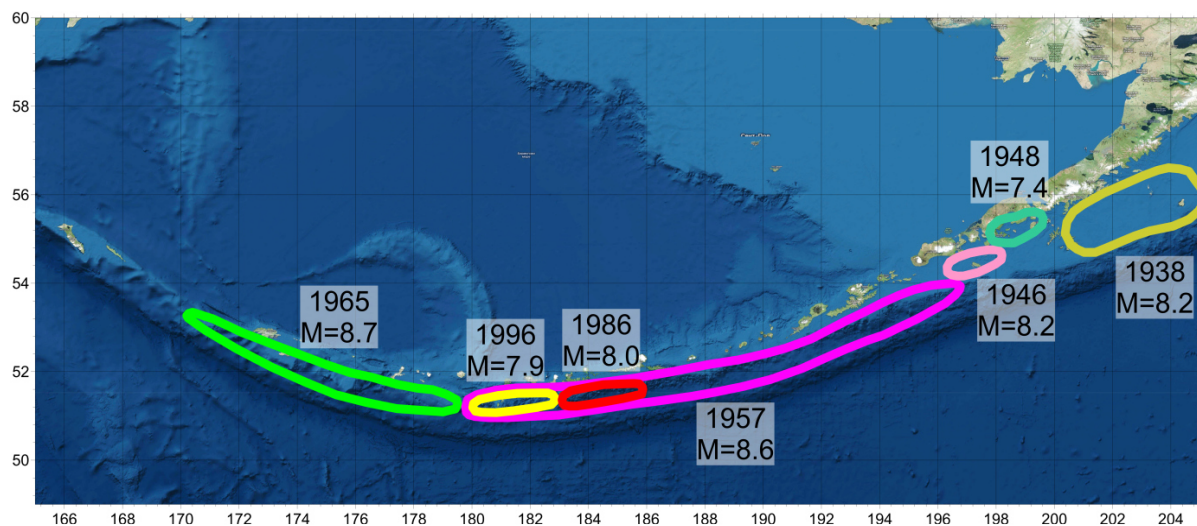


Рис. 1. Схема очаговых зон крупных землетрясений Алеутского архипелага в XX в. по [4]. Для упрощения визуализации долготы западного полушария показаны значениями, продолжающими порядок долгот восточного полушария (значение 190° соответствует 170° з.д., 200° – 160° и т.д.).

сегменты могут быть вместилищем очагов сильных землетрясений, а более мелкие – соответственно более слабым.

Подобные сегменты должны быть тектонически изолированы друг от друга [2]. Однако в условиях скудости прямых данных о конфигурации и ранге разрывных нарушений, сделать это можно только по косвенным данным, проявляющихся в пространственно-временных особенностях протекания потока сейсмических событий. Кроме того, землетрясения, особенно сильные, обычно приурочены не просто к глубинному разлому, а к узлу пересечения нескольких разломов [3]. Поэтому границы интересующих нас сегментов должны проходить не по тектоническим разрывам, а, наоборот, по разделяющим их более стабильным участкам.

Обзор публикаций

На рис. 1 показано как Алеутская дуга естественно делится на большие участки, соответствующие областям подготовки крупнейших землетрясений, произошедших в XX в. Эта схема демонстрирует два факта: отсутствие перекрытия очагов одноранговых событий, а также вложение очагов более слабых землетрясений внутрь очагов более крупных.

Конечно, данный пример слаб малой статистикой и доказывает необходимость более детальных исследований. Тем не менее, на основании присутствия (или отсутствия как в случае Командорских островов) очагов крупных землетрясений авторы исследования [4] провели упрощённое сегментирование Алеутского региона (рис. 2а).

К сожалению, в данной схеме сегментирования факт вложения очагов более слабых землетрясений внутрь очагов более сильных не учён. Однако это следует отметить, чтобы применить для дальнейшего построения уточнённой иерархической схемы.

Кроме того, в работе [5] на основании анализа морфометрических параметров рельефа островов

Алеутского архипелага, также было проведено его разделение на ряд сегментов (рис. 2б).

При построении этого рисунка границы сегментов, выделенные автором, были уточнены нами с учётом особенностей подводного рельефа и расширены на юг в область, где и происходят в основном землетрясения. Для целей анализа современной сейсмичности подход, использованный в работе [5] имеет ряд ограничений. Во-первых, он базируется на данных по рельефу только суши, которая в регионе имеет весьма ограниченное распространение, а рельеф морского дна не рассматривается. Во-вторых, сейсмически наиболее активная зона не совпадает с положением самого архипелага, а смещена к югу от него в сторону глубоководного жёлоба. В-третьих, выведена из анализа та часть островов, которая протянулась вдоль Аляскинского полуострова.

При сравнении рис. 2а и рис. 2б можно видеть, то у разных авторов совпадает только Командорский сегмент, а все остальные сегменты из [5] сливаются в большой Западно-Алеутский сегмент. Сегменты Шумагинский и Семиди не нашли своего аналога.

Методика исследований

Для проведения анализа был взят каталог NEIC [6], в части района Алеутской островной дуги почти вековой длительности (с 1916 г.) объёмом более 16 тыс. сейсмических событий разной магнитуды (не менее 2,5). Конечно, в силу развития и совершенствования наблюдательной сети, половина этих событий была зарегистрирована в течение последних 20 лет.

Основным дизъюнктивным нарушением здесь является сверхглубинный разлом, отмечаемый наклонённой в сторону тыла дуги сейсмофокальной зоной [7], к которой и приурочена основная масса землетрясений. Однако если построить простое облако эпицентров, то можно увидеть, что в их распределении прослеживаются многочисленные как продольные, так и поперечные неоднородности.

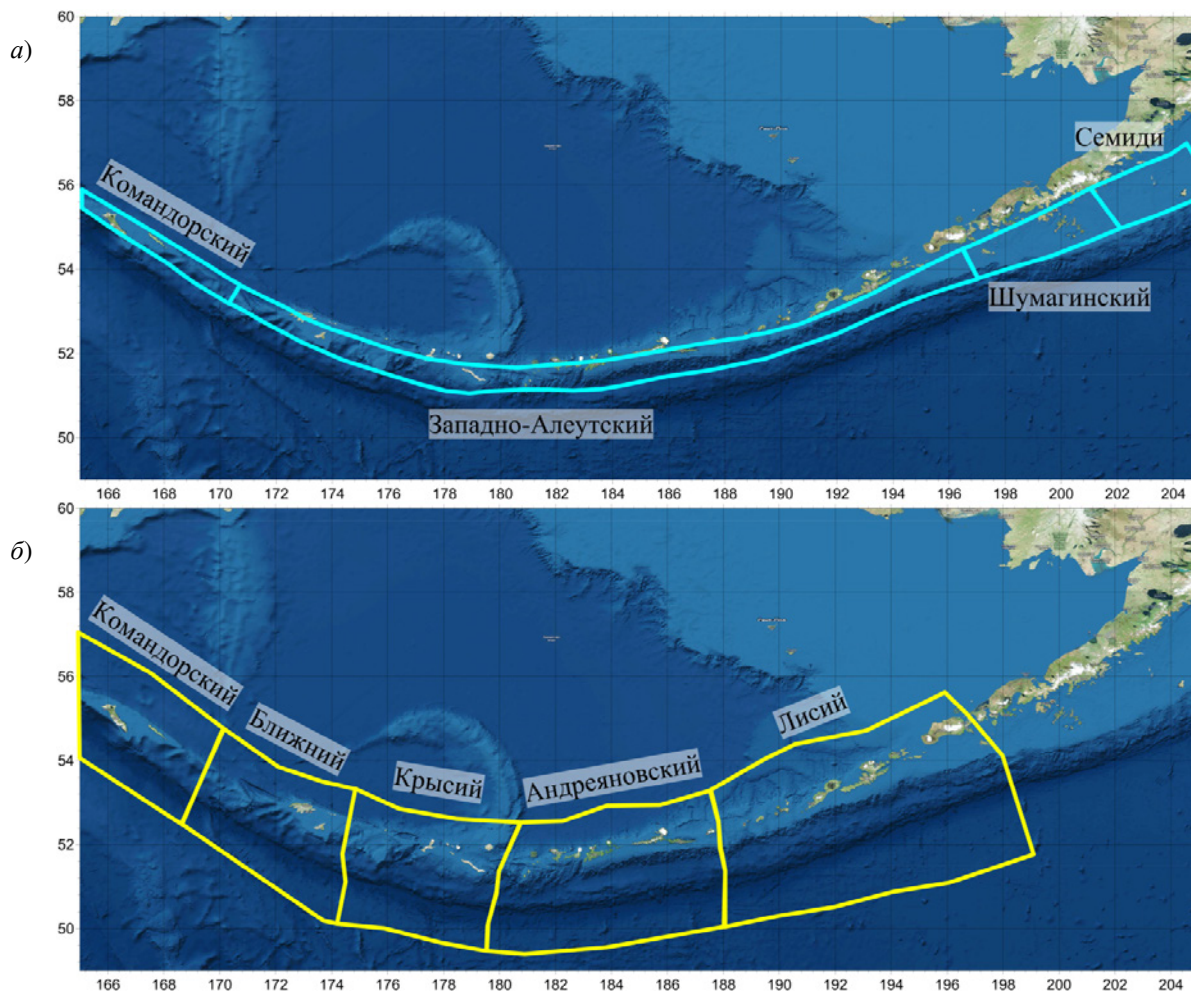


Рис. 2. Сегментирование Алеутского архипелага: а – по [4], б – по [5].

Количественная характеристика, позволяющая оценить меру этих сгущений и разрежений эпицентров на изучаемой территории, – пространственная плотность очагов [8], которая была получена как число эпицентров, попадающих в круге диаметром 1° (рис. 3). Значения плотности рассчитывались по сетке

с шагом $0,1^\circ$. Иные величины размера сканирующего окна были предметом моделирования, но давали менее удовлетворительный результат. При меньшем диаметре поле распадалось на многочисленные фрагменты, а при большем – наблюдалось излишнее усреднение результатов.

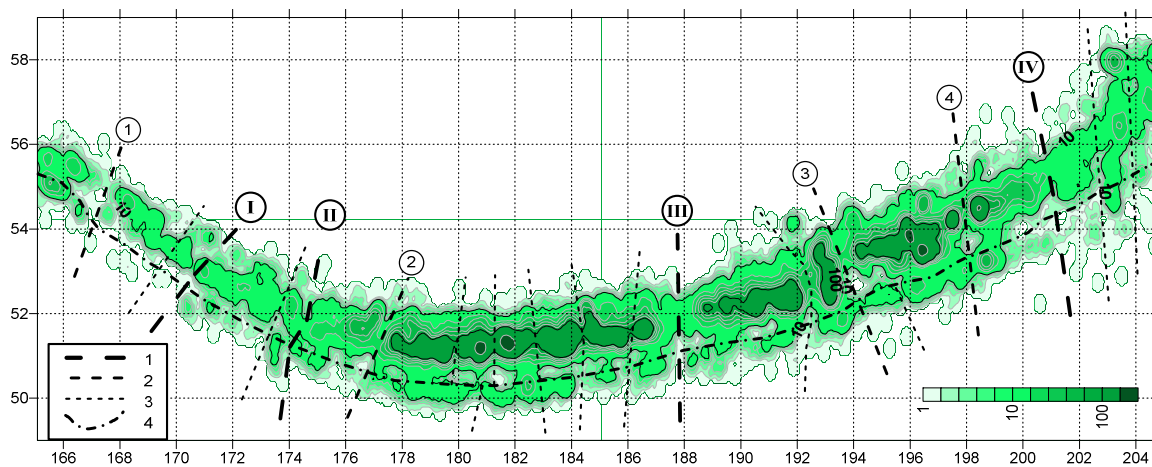


Рис. 3. Пространственная плотность эпицентров, $(^\circ)^{-2}$ и структура сегментирования территории: 1-3 – границы поперечных сегментов разного ранга (границы 3 ранга не пронумерованы); 4 – продольная граница между внешней и внутренней частями дуги.

Можно видеть, что плотность эпицентров характеризуется антилогарифмическим законом пространственного распределения. В поперечной структуре островной дуги выделяется несколько крупных сейсмически активных участков, прерываемых более спокойными интервалами. Границами сегментов выступает не выход сейсмофокальной зоны на поверхность и не поперечные межблоковые разломы [9], а стабильные блоки между ними. И чем больше перепад значений плотности очагов при этом наблюдается, тем более высокоранговые сегменты при этом могут быть выделены.

При этих построениях намеренно использовался полный каталог со всеми выделенными форшоками и афтершоками сильных землетрясений. Однако и без них картина принципиально не меняется.

Весьма чётко прослеживается продольная граница, отделяющая фронтальную и тыльную части дуги. Она точно совпадает с бровкой крутого внутреннего склона глубоководного жёлоба.

Анализируя полученный результат, можно провести границы между участками с разной плотностью эпицентров и выделить несколько разноранговых сегментов. Всего было выделено по 4 границы 1-го и 2-го ранга. Они пронумерованы на рис. 3 римскими и арабскими цифрами соответственно. Также отмечены несколько границ 3-го ранга. Основным критерием для определения ранга границы был уровень значений пространственной плотности эпицентров, наблюдающихся в радиусе 1° от границы. Кроме того учитывалось наличие промежутков с отсутствием какой-либо сейсмической активности.

Границы 1-го ранга делят Алеутскую дугу на 5 сегментов с принципиальным различием плотности эпицентров в прилегающих территориях. Перепад значений плотности эпицентров на них приблизительно 15-кратный в диапазоне от $n \cdot 100$ до $n \cdot 10$ ($^\circ$)⁻². Исключение составляет только граница I, которая отмежевывает Командорские острова от остальной части Алеутского архипелага. Границы II и IV, по сути, выделяют менее активные края дуги от более активной середины на долготях 174° и 201° (159° з.д.). Если бы не широкий разрыв в самой середине на долготе 188° (172° з.д.), то можно было бы и не выделять границу III.

Границы 2-го ранга играют подчинённую роль, хотя отмечают ~30-кратные изменения значений плотности эпицентров, но уже более низкого уровня от $n \cdot 10$ до $n \cdot 1$ ($^\circ$)⁻².

Границы 3-го ранга более многочисленны. Они подчёркивают только двух- или трёхкратные перепады значений или приурочены к областям отсутствия эпицентров. Причём некоторые границы 3-го ранга, в отличие от остальных, не всегда прослеживаются поперёк всей структуры Алеутской дуги. Иногда они существуют отдельно для внешней и внутренней сторон.

Особенности распределения очагов по глубине тоже могут дать информацию для сегментирования

территории в зависимости от характера протекания сейсмического процесса. Были построены карты статистических характеристик, позволяющих оценить закономерности блокового строения литосферы: среднего значения, дисперсии нижнего квартиля, медианы, верхнего квартиля. Вычисления аналогично проводились в плавающем круге диаметром 1° .

Карты среднего значения (рис. 4), демонстрирует периодически повторяющиеся увеличения и уменьшения мощности сейсмофокальной зоны вдоль островной дуги, особенно в её внутренней части. Наиболее интенсивно эти колебания проявляются в средней и восточной части территории. Средний период их равен 230 км.

Данное построение может быть дополнительным основанием для блоковой сегментации литосферы. Тем более что выделенные аномалии во многих случаях несколько вытянуты поперёк островной дуги и хорошо коррелируют с границами сегментов, отмеченными ранее по особенностям распределения пространственной плотности эпицентров. Это совпадение не всегда точно наблюдается для границ 1-го ранга (например, границы I и II). По-видимому, на их существование влияют более масштабные факторы.

Некоторое представление о вертикальном развитии закономерности распределения гипоцентров вдоль внутренней части дуги можно получить по линии профиля (рис. 5), где подошва сейсмоактивного слоя представлена графиком нижнего квартиля, середина – медианы, а кровля – верхнего квартиля. Конечно, квартили отсекают по четверти всех очагов с каждой стороны, но демонстрируют более устойчивое поведение, чем минимум и максимум. Появление местами на графиках горизонтальной линии 33 км связано с тем, что до последнего времени точность определения глубины очага нередко была не очень высокой. И в тех местах, где количество зарегистрированных событий невелико, статистика оказывается ненадёжной.

Анализируя эти графики можно отметить, что сейсмофокальная зона Алеутской дуги не является равномерно погружающейся в сторону Берингова моря моноклинально. Наоборот, она дезинтегрирована на множество блоков, занимающих сильно различающееся гипсометрическое положение. При этом чаще всего видимая мощность самих блоков сохраняется.

Однако в некоторых случаях структурный план кровли и подошвы не совпадает. В тех местах, где проходят границы сегментов 1-го ранга I-III, нижний квартиль увеличивается до 30-33 км. Причём в широкой (около 1° по долготе) окрестности границ 1-го ранга такие значения кровли сейсмоактивной зоны имеют достаточно стабильные значения. Граница № IV такой особенностью не обладает, хотя непосредственно на самой границе кровля всё же проходит на глубине 30 км. В остальных местах зоны высоких градиентов всех графиков ассоциируются с границами более низких рангов.

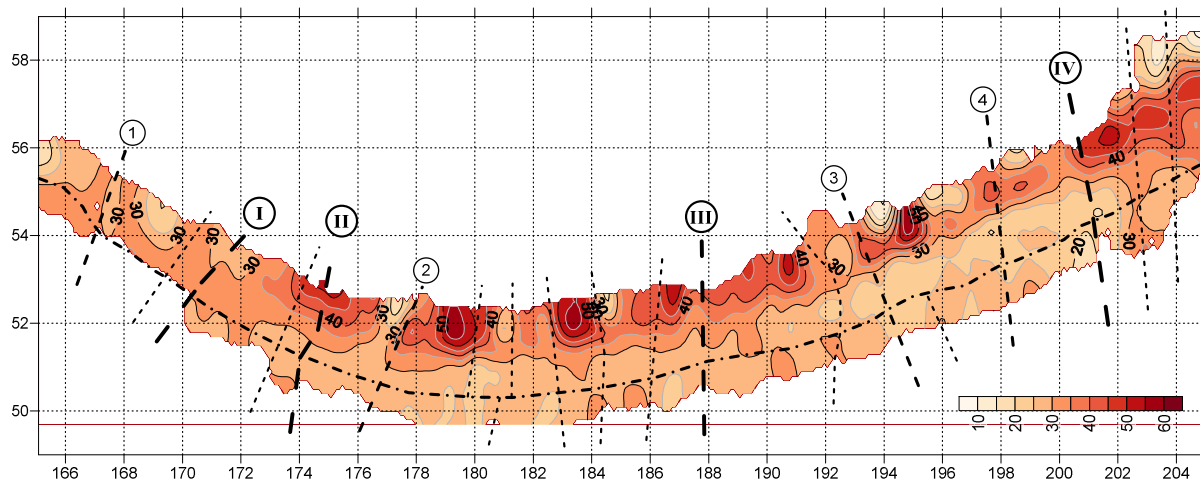


Рис. 4. Среднее значение глубин гипоцентров (км) в круге диаметром 1°. Границы сегментирования продублированы с рис. 3

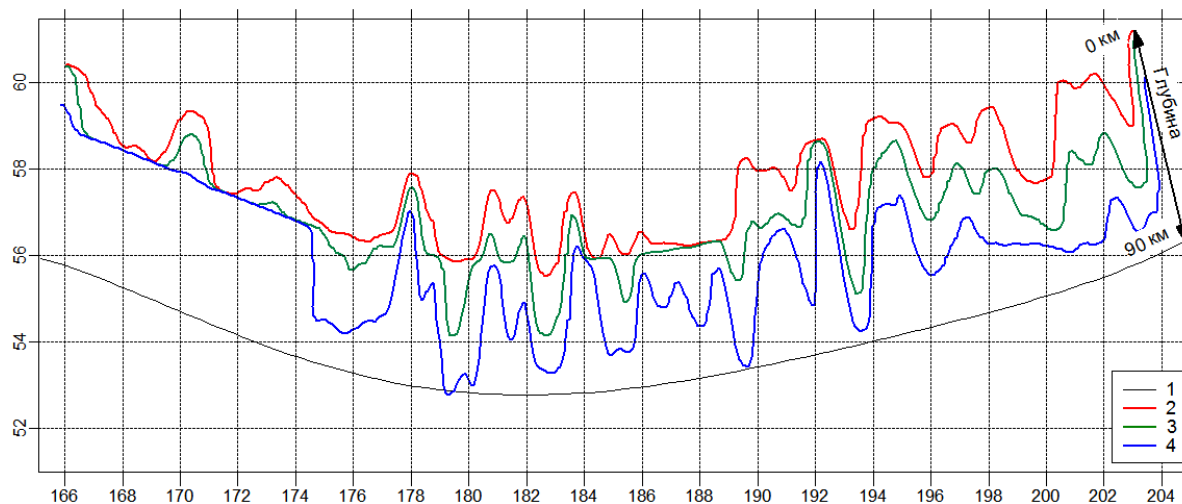


Рис. 5. Графики статистических характеристик распределения глубин очагов вдоль внутренней части дуги: 1 – линия профиля; 2-4 – статистические характеристики распределения глубин очагов: 2 – нижний квартиль, 3 – медиана, 4 – верхний квартиль.

Таким образом, основаниями для выделения границ сегментов и определения их рангов можно отметить следующие феномены:

- наличие градиентов (горизонтальных линейментов, перпендикулярных основной структуре островной дуги) в функции пространственной плотности эпицентров землетрясений и уровень значений этой функции (уровень для границ 1-го и 2-го ранга, а также 2-го и 3-го различается приблизительно в 10 раз);
- глубину кровли сейсмоактивной зоны около 30 км с определённой выдержанностью этого значения поблизости для границ 1-го уровня и зоны высоких вертикальных градиентов, как кровли, так и подошвы для границ 2-уровня.

Результаты

Резюмируя наблюдения, сделанные по разнородным данным можно сделать вывод, что полученное сегментирование территории может быть принято в качестве подспорья для разделения Алеутской островной дуги на изолированные участки, в которых

сейсмический процесс протекает с сохранением причинно-следственных связей. Следовательно, с учётом ранга сегментов, можно проследить связь между самыми сильными событиями в данном сегменте и потоком событий, в нём протекающем.

Сопоставляя границы, выделенные другими авторами и по результатам проведённого нами анализа, можно найти множественные совпадения. Например, граница I соответствует границе между Командорским и Западно-Алеутским сегментом, II – Ближним и Крысим, III – Андреяновским и Лисьим, 4 совпадает с восточной границей Лисьего, IV – между Шумагинским и Семиди. Однако имеются и расхождения, например, не нашли своего соответствия границы 1-3. Принимая это во внимание, был предложен новый, уточнённый вариант сегментирования Алеутского региона (рис. 6).

Иерархия сегментов на данной схеме преимущественно наследует иерархию границ выделенных нами по распределению пространственной плотности

эпицентров. В тоже время здесь, по возможности, хотя и

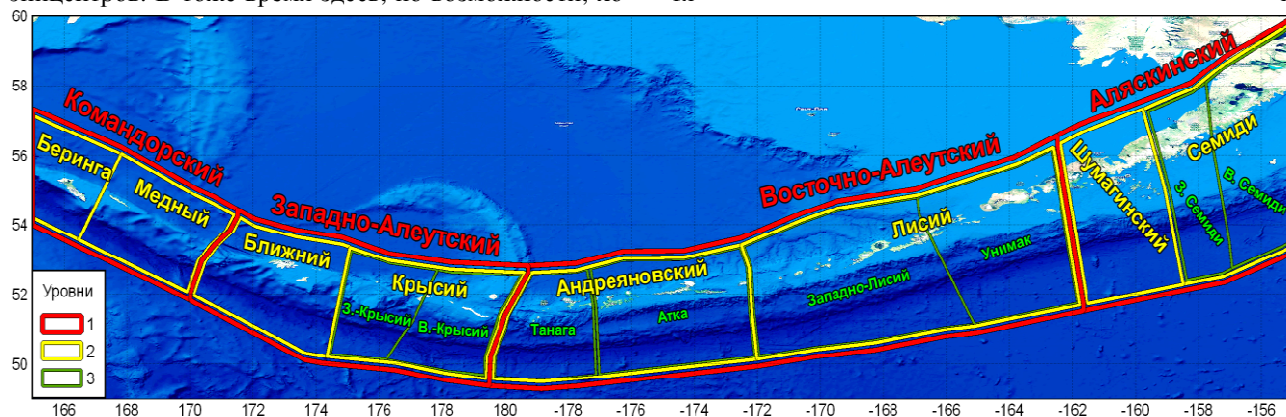


Рис. 6. Новый вариант сегментирования с многоуровневой иерархией.

Таблица 1

Структура сегментов

Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
Командорский	Беринга	
	Медный	
Западно-Алеутский	Ближний	Западно-Крысий
	Крысий	Восточно-Крысий
Восточно-Алеутский	Андреяновский	Танага
		Атка
	Лисий	Западно-Лисий
Аляскинский	Шумагинский	Унимак
	Семиди	Западный Семиди
		Восточный Семиди

с некоторой небольшой коррекцией, сохранено положение границ, предложенных в [4] и [5]. Однако сегменты приобрели собственную иерархическую структуру, обобщённую в табл. 1. Сегменты 3-го уровня играют подчинённую роль и выделяются только в том случае, если вмещающие их сегменты 2-го уровня имеют явные различия значений функции пространственной плотности эпицентров в различных своих частях.

Командорский сегмент 1-го уровня в целом соответствует построениям других авторов. Разделение его на две более мелкие части обусловлено наличием между ними широкого малоактивного промежутка. Кроме того, сегмент Медный характеризуется полным отсутствием очагов на внешней стороне глубоководного жёлоба, а также средние значения плотности очагов в нём ($15 \text{ (}^\circ\text{)}^{-2}$ за 100 лет) вдвое меньше, чем в сегменте Беринга ($30 \text{ (}^\circ\text{)}^{-2}$). В [5] также упоминается о том, что о. Беринга и о. Медный отличаются по «морфоструктурному устройству».

Западно-Алеутский сегмент 1-го уровня объединил два участка из [5]: Ближний и Крысий (отнесённые ко 2-му уровню) с некоторым уточнением границ между ними. Восточная часть последнего сильно отличается от остальной части Крысью сегмента вдвое большей плотностью очагов (до $260 \text{ (}^\circ\text{)}^{-2}$), что потре-

бовало разбить его на два сегмента 3-го уровня: Западно-Крысий и Восточно-Крысий (граница между ними проходит прямо через о. Кыска). Принципиально разное строение западной и восточной части о. Кыска также подтверждается в [5].

Вероятно, в соответствии с характером сейсмической активности, сегмент 2-го уровня Медный следовало перенести из Командорского в Западно-Алеутский сегмент. Однако построения других авторов противоречат этому.

Восточно-Алеутский сегмент 1-го уровня (чья восточная граница совпадает с соответствующей границей его Западно-Алеутского аналога из [4]) характеризуется наибольшими значениями плотности очагов землетрясений. Границей III он делится на два сегмента 2-го уровня: Андреяновский и Лисий, аналогичные одноимённым из [5]. Те, в свою очередь, границами более низкого порядка – ещё по два: Танага, Атка и Западно-Лисий, Унимак, соответственно. Сегменты Танага и Атка отличаются наибольшими значениями плотности очагов – максимум превышает $300 \text{ (}^\circ\text{)}^{-2}$. Западно-Лисий сегмент и сегмент Унимак немного спокойнее – не более $200 \text{ (}^\circ\text{)}^{-2}$.

В пределах Аляскинского сегмента 1-го уровня выделяется пара сегментов 2-го уровня: Шумагинский и Семиди, аналогичные одноимёнными из [4]. Сейсмичность первого из них ещё довольно велика (до $285 \text{ (}^\circ\text{)}^{-2}$), а второго – уже вчетверо меньше. Причём западная часть Семиди особенно тихая (не более $25 \text{ (}^\circ\text{)}^{-2}$), поэтому он был разделён на два сегмента более низкого порядка.

Заключение

Разработанная схема сегментирования Алеутского региона является новой и может быть полезна при среднесрочном прогнозировании землетрясений. Тем не менее, она требует дальнейшего уточнения с учётом энергетического представления сейсмического процесса. Очевидно, что оценка интенсивности сейсмического процесса исключительно по «штучному» учёту землетрясений менее эффективна по сравнению с оценкой энергии, выделившейся при них. Имеет

смысл выяснить с какой пространственной плотностью эта энергия имеет выход в тех же сегментах.

Универсальных критериев выделения границ (и определения их ранга), а также сегментов (и определения их уровня), имеющих абсолютный характер, сформулировать не удалось. Сейчас эти построения производятся с учётом результатов сеймотектонических и геоморфологических исследований других авторов, а также на основании анализа картины и интенсивности проявления в пространстве таких объективных характеристик сейсмичности как пространственная плотность эпицентров и вертикальное развитие сейсмофокальной зоны островной дуги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочарян, Г. Г. Масштабный эффект в сеймотектонике / Г. Г. Кочарян // Геодинамика и тектонофизика. 2014. № 5 (2). С. 353–385. DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0133
2. Шерман, С. И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция / С. И. Шерман. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 359 с.
3. Калинина, Л. Ю. Роль разломов и глубинной структуры в пространственном контроле землетрясений на Северо-

Востоке России: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.01, 25.00.10. – Магадан. – 2005. – 134 с.

4. Wesson, R. L. Revision of time-Independent probabilistic seismic hazard maps for Alaska / R.L. Wesson, O.S. Boyd, C.S. Mueller, Ch.G. Bufe, A.D. Frankel, M.D. Petersen // U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1043, 2007. – 33 pp. Available from: http://pubs.usgs.gov/of/2007/1043/pdf/of07-1043_508.pdf (last accessed: 08.05.2017).
5. Булочникова, А. С. Морфотектоника Алеутской островной дуги: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.25. Москва. – 2013. – 187 с.
6. Earthquake Catalogs & Bulletins NEIC. Available from: http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html (last accessed 08.03.2017).
7. Тараканов, Р. З. Роль сейсмофокальной зоны в формировании и развитии структур Курило-Охотского региона / Р. З. Тараканов, М. Ю. Андреева // Океанская геология. – 2012. – Т. 31. – № 6. – С. 87-96.
8. Захаров, В. С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: дис. ... докт. геол.-минерал. наук: 25.00.03. – Москва. – 2014. – 281 с.
9. Эрлих, Э. Н. Современная структура и четвертичный вулканизм западной части Тихоокеанского кольца / Э. Н. Эрлих // Новосибирск, 1973. 244 с.

Воронежский государственный университет

Силкин Константин Юрьевич, доцент, кандидат геолого-минералогических наук

E-mail: Const.Silkin@mail.ru

Тел.: +7-909-210-05-52

Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, Москва

Родина Светлана Николаевна, научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук

E-mail: Rodina@IFZ.ru

Тел.: +7-926-899-84-60

Voronezh State University

Silkin K. Yu., Associate Professor, PhD in Geological and Mineralogical Sciences

E-mail: Const.Silkin@mail.ru

Tel.: +7-909-210-05-52

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow

Rodina S. N., Research Officer, PhD in Geological and Mineralogical Sciences

E-mail: Rodina@IFZ.ru

Tel.: +7-926-899-84-60