

УДК 550.34(571.642)

**АНАЛИЗ СИСТЕМНОГО ЕДИНСТВА СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ
КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ И ОСТРОВА САХАЛИН
НА ОСНОВЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ****Гусева И.С., Архипова Е.В.***Государственный университет «Дубна», Дубна, e-mail: gusewa.irin2011@yandex.ru*

Современный Дальний Восток России является регионом приоритетного освоения и развития, где планируется масштабное строительство. Вместе с тем указанный регион отличается повышенным уровнем сейсмичности, в прошлом имеются случаи довольно катастрофических сейсмических событий. Особый интерес представляют районы полуострова Камчатки, Курильских островов и Сахалина, являющиеся островными дугами Тихоокеанской окраины. Высокая сейсмичность в районе Курило-Камчатской островной дуги и о. Сахалин связана с тем, что эти регионы расположены в зоне субдукции Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит под континентальную литосферу Евразии. Сейсмическая активность в пределах рассматриваемой области неоднородна по глубине, есть участки с большей плотностью гипоцентров землетрясений. В статье проанализирован и сопоставлен временной режим сейсмической активности Курил, Камчатки и Сахалина с 1973 по 2018 гг. В связи с неоднородностью в распределении гипоцентров землетрясений по глубине временной ход сейсмичности рассмотрен в пределах верхней и нижней коры в интервалах глубин с высокой концентрацией гипоцентров. Для анализа временного хода сейсмической активности составлены выборки сейсмических событий перечисленных регионов. Анализ проведён на нескольких масштабах временного осреднения – рассчитаны временные ряды годовых сумм, а также годовых сумм со скользящей пятилетней и десятилетней средней, к ним построены соответствующие графики временных вариаций сейсмичности. Для временных рядов выполнена парная корреляция и на основе полученных данных сформулированы выводы о системном единстве современного развития Курило-Камчатской островной дуги и о. Сахалин.

Ключевые слова: Курило-Камчатская островная дуга, Сахалин, сейсмическая активность, субдукция**THE ANALYSIS OF SYSTEMIC UNITY OF MODERN DEVELOPMENT
OF THE KURIL-KAMCHATKA ISLAND ARC AND SAKHALIN ISLAND
ON THE BASIS OF SEISMOLOGICAL DATA****Guseva I.S., Arkhipova E.V.***State University Dubna, Dubna, e-mail: gusewa.irin2011@yandex.ru*

Modern Far East of the Russian are region of priority exploration and development, where large-scale building is planned. However, this region is characterized by an increased level of seismicity, in the past there are cases of quite catastrophic seismic events. The areas of Kamchatka Peninsula, Kuril Islands and Sakhalin Island, which are the island arcs of the Pacific rim, are of special interest. High seismicity in the area of the Kuril-Kamchatka island arc and Sakhalin Island is related to the fact that these regions are located in the subduction zone of the Pacific and North American lithospheric plates under the continental lithosphere of Eurasia. Seismic activity within the considered area is heterogeneous in depth, there are areas with higher density of earthquake hypocenters. The time regime of seismic activity of the Kuriles, Kamchatka and Sakhalin from 1973 to 2018 is analyzed and compared in the article. Due to the heterogeneity in the distribution of earthquake hypocenters over depth, the time course of seismicity is considered within the upper and lower crust in the depth intervals with a high concentration of hypocenters. For the analysis of time regime of seismic activity the samples of seismic events of the listed regions are made. The analysis is carried out on several scales of time averaging – the time series of annual amounts, as well as annual amounts with a moving five-year and ten-year average are calculated, the corresponding graphs of time variations of seismicity are constructed. For calculated time series pair correlation was carried out. On the basis the obtained data the conclusions about the systemic unity of the modern development of the Kuril-Kamchatka island arc and Sakhalin island were formulated.

Keywords: Kuril-Kamchatka island arc, Sakhalin, seismic activity, subduction

Интенсивное социально-экономическое развитие Дальнего Востока является одним из главных приоритетов России на ближайшие десятилетия [1]. Вместе с тем этот макрорегион отличается высоким уровнем сейсмической опасности, связанным с его приуроченностью к зоне субдукции Тихоокеанского подвижного пояса, и потому проявления сейсмической активности, по сути, являются отголосками современного развития этой тектонической мегаструктуры.

Сейсмоактивные области Дальнего Востока расположены во внутреннем обрамлении Охотской плиты. Высокая сейсмичность на границах плиты обусловлена ее расположением в зоне контакта трёх литосферных плит – Евразийской, Североамериканской и Тихоокеанской (рис. 1) [2]. Плита ограничена глубинными разломами в основном сдвигами, а на юго-востоке – современной субдукционной зоной.

Курило-Камчатская зона субдукции является одним из наиболее сейсмоактивных регионов северо-восточной Евразии, где скорость пододвигания Тихоокеанской литосферной плиты под Североамериканскую и Охотскую плиты достигает 8 см/год. Взаимодействие литосферных плит сопровождается тектоническими деформациями, которые проявляются как на границе плит, так и в её окрестностях [3]. Наиболее высокая активность землетрясений проявляется вдоль Курильской островной дуги, подавляющее большинство землетрясений приурочено к глубинам до 100–150 км и с максимумом сейсмической активности на глубинах около 30–40 км. Высокий уровень сейсмичности в районе Курильских островов подтверждает многолетняя статистика зарегистрированных землетрясений. В среднем каждые трое суток здесь происходит землетрясение с магнитудой $M = 4.0$. Повторяемость событий большей магнитуды такова: примерно раз в месяц для $M = 5.0$, раз в полгода – для $M = 6.0$, раз в 2 года – для $M = 7.0$. В среднем, каждые 10 лет здесь случаются катастрофические землетрясения с $M = 8.0$ и более [4].



Рис. 1. Схема взаимодействия литосферных плит Дальневосточной окраины России. Сплошными линиями показаны границы плит, зубчатой линией – граница вдоль зоны субдукции, стрелки показывают направление и скорость движения литосферных плит в см/г

Тектонические структуры о. Сахалин приурочены к северной меридиональной ветви Сахалино-Японской островной дуги,

и сейсмичность о. Сахалин связана главным образом с субмеридиональными глубинными разломами, отделяющими Охотскую литосферную плиту от Евразийской. Движение этих плит друг относительно друга, а также развитие спрединговых процессов в рифтовой структуре Татарского пролива сопровождается активными проявлениями сейсмичности [5]. На о. Сахалин очаги мелкофокусных землетрясений сосредоточены в коре на глубинах от 0 до 35 км. Глубокофокусные землетрясения на глубинах от 250 до 650 км приурочены к Курильской сейсмофокальной зоне и не представляют значимой сейсмической опасности. По сравнению с Курильским районом сейсмичность Сахалина носит более умеренный характер. Основную опасность представляют землетрясения, с $M \sim 5$ и более, которые, как правило, приурочены к основным активным разломным зонам: Ребун-Монеронской, Западно-Сахалинской, Центрально-Сахалинской и Северо-Сахалинской [4].

Тектонически активные структуры Дальневосточного региона обнаруживают себя активной сейсмичностью, которая, по существу, отражает периоды ослабления и усиления активности геодинамических процессов. При этом активность землетрясений в объемах литосферы, которые находятся под влиянием единых процессов, изменяется сходным образом. С тем, чтобы выявить геодинамически связанные сейсмоактивные уровни для всех трех выделенных районов, включая п-в Камчатка, Курильские о-ва и о. Сахалин, выполнен анализ временных рядов сейсмичности с 1973 по 2018 гг. Исследование взаимосвязи проявлений сейсмичности и современных геодинамических процессов в пределах Курило-Камчатской островной дуги и о. Сахалин позволяет лучше понять современное сейсмогеодинамическое развитие этих регионов, в будущем более точно прогнозировать периоды сейсмической активизации и, возможно, влиять на их естественный ход с целью уменьшения катастрофических последствий сейсмических событий высокой интенсивности.

Отмечено, что долговременные вариации числа сейсмических событий Дальневосточного региона обнаруживают корреляционные связи, подтверждающие их системное единство с другими тектонически активными территориями Тихоокеанского подвижного пояса [6, 7]. Особенностью предлагаемой работы является использование актуальных данных по сейсмичности за последние 2015–2018 гг. [8], а также расчет

временных рядов количества сейсмических событий для уровней высокой концентрации очагов землетрясений в пределах верхней и нижней коры [2, 5].

Цель исследования: анализ временного хода сейсмической активности в пределах Курило-Камчатской островной дуги и о. Сахалин на сейсмически активных уровнях за период с 1973 по 2018 г. и выявление их возможной взаимосвязи на основе парной корреляции временных рядов, отражающих долговременные вариации количества землетрясений.

Материалы и методы исследования

Анализ возможной взаимосвязи временных вариаций сейсмичности для различных сейсмоактивных горизонтов литосферы проводился с использованием сейсмологических данных каталога Геологической службы США (USGS) [8]. На начальном этапе для п-ва Камчатка, Курильских о-вов и о. Сахалин сформированы исходные выборки землетрясений, произошедших с 1973 по 2018 г., далее на их основе проводился анализ распределения очагов по глубине, формировались выборки для отдельных наиболее активных горизонтов земной коры, с помощью графиков повторяемости оценивалась минимальная магнитуда выборок, выполнялся расчет временных рядов и их корреляционное сопоставление.

Основной объём выборок сейсмоактивных горизонтов составили сейсмические события средней силы, начиная с M от 4,5. Такие события достаточно многочисленны, уверенно регистрируются с самого начала периода наблюдений и, по мнению авторов, наиболее точно отражают режим и характер современных геодинамических процессов на рассматриваемых интервалах времени.

На основе выборок выделены уровни с максимальной концентрацией очагов землетрясений в пределах верхней и нижней коры, на каждом из уровней прослежены вариации количества землетрясений во времени. Для верхне- и нижнекорового сейсмоактивных уровней с 10 до 15 км и с 30 до 35 км в каждом районе рассчитаны временные ряды годовых сумм, ряды годовых сумм со скользящим осреднением по пяти годам и сдвигом в 1 год, ряды годовых сумм со скользящим осреднением по десяти годам и сдвигом в 1 год. Для временных рядов выполнена парная корреляция временных рядов всех сейсмоактивных областей.

Результаты исследования и их обсуждение

При сопоставления графиков годовых сумм числа землетрясений верхней коры выяснилось, что наибольшее число верхнекоровых землетрясений характерно для Курильских островов. Последнее связано с наличием здесь сейсмофокальной зоны, которая отличается максимальной сейсмической активностью. Наиболее высокой верхнекоровой активностью за весь период наблюдений характеризуется 2007 г., а 1996 г. отличается максимальным числом нижнекоровых землетрясений для всего Курило-Камчатского региона и о. Сахалин (рис. 2). Стоит отметить, что активизация сейсмичности Курильских о-вов и п-ва Камчатка на глубинах 30–35 км, происходит практически одновременно. При этом оба региона характеризуются близким числом сейсмических событий за период с 1973 по 2018 гг. в отличие от о. Сахалин, в пределах которого число нижнекоровых землетрясений значительно ниже. Последнее объясняется тем, что Курилы и Камчатка объединены в пределах Курило-Камчатской островной дуги – единой мегаструктуры, которая обособлена в пределах Тихоокеанского подвижного пояса и представляет собой один из наиболее сейсмоактивных регионов северо-западной Пацифики. Сходство временного хода сейсмичности Камчатского и Курильского сегментов дуги подтверждается высокими коэффициентами корреляции временных рядов на отдельных глубинных уровнях.

Временные ряды годовых сумм числа землетрясений со скользящим осреднением по пяти годам еще более отчетливо отражают ту же тенденцию сходства временных вариаций сейсмичности рассматриваемого Курильского и Камчатского сегментов Курило-Камчатской дуги. Во всех трёх сейсмоактивных районах отмечается резкое увеличение числа верхнекоровых землетрясений в интервале с 2000–2013 гг. Далее же после незначительного спада наблюдается дальнейший рост сейсмической активности, однако на Камчатке он более резкий, нежели в двух других районах. Для всех районов корреляционный анализ отражает почти синхронное изменение сейсмичности на уровнях 10–15 км – положительная корреляция с коэффициентом более 0,5 прослеживается для сейсмоактивных уровней верхней коры всех трёх районов. Высокая положительная корреляция числа сейсмических событий на уровне 30–35 км также очевидна для всех районов (рис. 3).

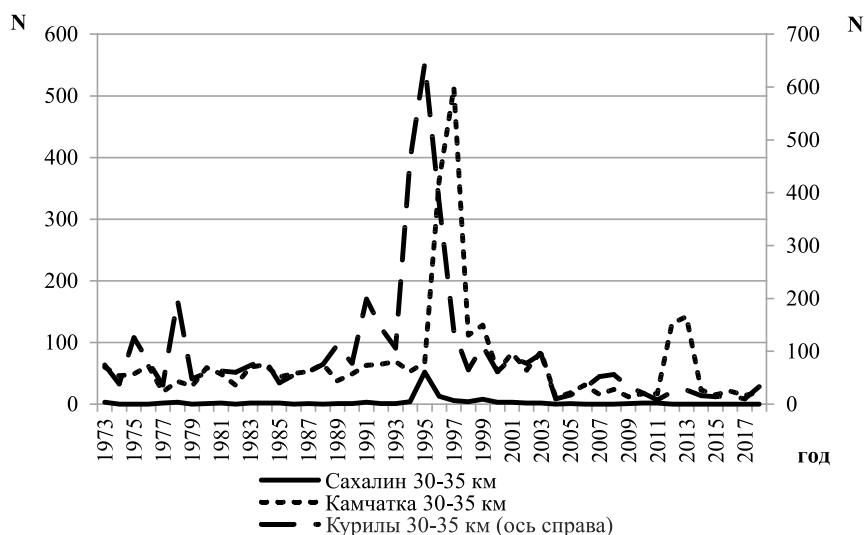


Рис. 2. Годовые суммы числа землетрясений нижней коры

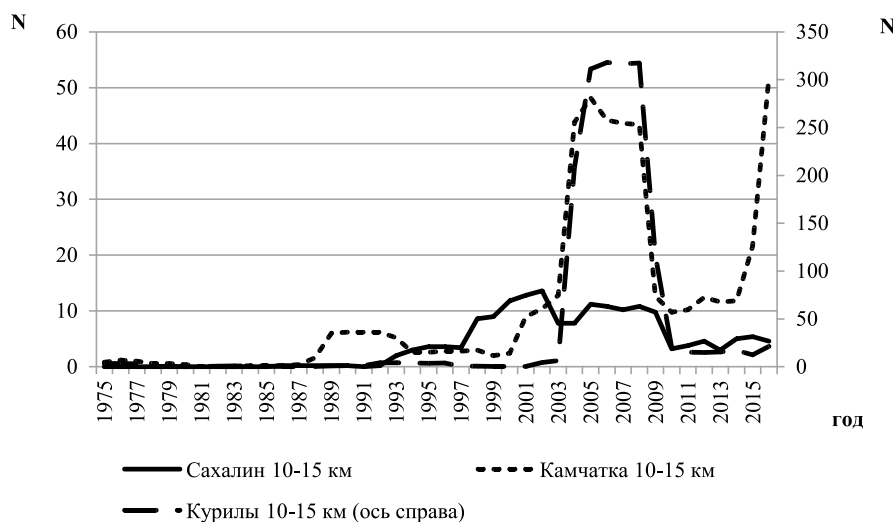


Рис. 3. Годовые суммы числа землетрясений верхней коры со скользящим осреднением по пяти годам (сдвиг 1 год)

Скользящее осреднение временных рядов годовых сумм по 10 годам позволяет ещё более сгладить годовые вариации сейсмичности и увидеть общие тенденции хода землетрясений для активных уровней верхней и нижней коры трех выделенных районов. Верхнекоровая сейсмичность имеет тенденцию к активизации во всех трёх районах, начиная с 2000-х гг. Общий ход нижнекоровой сейсмичности Камчатки, Курил и Сахалина отражает активизацию начиная с 1990-х гг., которая постепенно возрастает до 2000 г., а затем медленно снижается. Корреляционная таблица для временных рядов со скользящим осреднением по 10 гг.

отражает весьма высокую положительную корреляцию на одинаковых уровнях в пределах верхней и нижней коры (таблица).

Выводы

1. Высокие коэффициенты корреляции временных рядов для сейсмоактивных горизонтов на одинаковых уровнях подтверждают сходство тенденций в изменении сейсмичности во всех трёх рассматриваемых районах Дальнего Востока и являются свидетельством системного единства современного развития отдельных сегментов Курило-Камчатской островной дуги и о. Сахалин.

Корреляция годовых сумм числа землетрясений на сейсмоактивных уровнях верхней и нижней коры со скользящим осреднением по 10 годам, сдвиг 1 год

| | о. Сахалин 10–15 км | о. Сахалин 30–35 км | Курильские о-ва 10–15 км | Курильские о-ва 30–35 км | п-ов Камчатка 10–15 км | п-ов Камчатка 30–35 км |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| о. Сахалин 10–15 км | | 0,10 | 0,74 | –0,17 | 0,76 | 0,14 |
| о. Сахалин 30–35 км | 0,10 | | –0,39 | 0,94 | –0,35 | 0,92 |
| Курильские о-ва 10–15 км | 0,74 | –0,39 | | –0,54 | 0,91 | –0,40 |
| Курильские о-ва 30–35 км | –0,17 | 0,94 | –0,54 | | –0,54 | 0,84 |
| п-ов Камчатка 10–15 км | 0,76 | –0,35 | 0,91 | –0,54 | | –0,34 |
| п-ов Камчатка 30–35 км | 0,14 | 0,92 | –0,40 | 0,84 | –0,34 | |

2. Временные ряды годовых сумм землетрясений позволяют увидеть частные особенности изменений сейсмичности отдельных сейсмоактивных районов Дальнего Востока, в то время как скользящее осреднение по 5 и 10 годам со сдвигом в 1 год дает возможность оценить более общие тенденции временного хода сейсмичности.

3. Существуют различия в изменении активизации верхнекоревой и нижнекоревой сейсмичности отдельных сейсмоактивных районов Дальнего Востока: верхнекоревая возрастает в период после 2000-х гг., тогда как нижнекоревая активизируется в 1990-е гг.

4. Системное единство изменений сейсмичности на одинаковых уровнях глубины подтверждает наличие доминирующего геодинамического процесса, которым является в регионе субдукция океанической коры Североамериканской и Тихоокеанской плит под Курило-Камчатскую и Сахалино-Японскую островные дуги.

Список литературы / References

1. Федеральная целевая программа «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 года». [Электронный ресурс]. URL: <https://urexpert.online/wp-content/uploads/2017/03/DVBR2025.pdf> (дата обращения: 31.05.2019).

Federal Target Program «Economic and social development of the Far East and the Baikal region for the period up to 2025». [Electronic resource]. URL: <https://urexpert.online/wp-content/uploads/2017/03/DVBR2025.pdf> (date of access: 18.02.2019) (in Russian).

2. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И. Геотраверс региона Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2005. № 5. С. 45–58.

Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B., Rashidov V.A., Sergeeva N.A., Filatova N.I. Geotravers of the region of the Okhotsk sea // Vestnik KRAUNTS. Series «Earth Sciences». 2005. № 5. P. 45–58 (in Russian).

3. Прытков А.С., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И. Современная геодинамика Курильской зоны субдукции // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 1. С. 23–28.

Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Frolov D.I. Recent geodynamics of the Kuril subduction zone // Russian Journal of Pacific Geology. 2017. V. 11. № 1. P. 19–24. DOI: 10.1134/S1819714017010067.

4. Тихонов И.Н., Левин Б.В. Прогноз сильных землетрясений Сахалинской области: история, результаты и перспективы // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: сб. материалов Всероссийской научной конференции с международным участием. В 2-х т. под ред. Б.В. Левина, О.Н. Лихачевой. Т. 1. Южно-Сахалинск: Дальнаука, 2015. С. 41–45.

Tikhonov I.N., Levin B.V. Prediction of strong earthquakes in the Sakhalin region: history, results and prospects // Geodynamic processes and natural disasters. Experience OfNeftegorsk: collection of materials of the all-Russian conference with international participation. In 2 volumes edited by B.V. Levin, O.N. Likhacheva. T. 1. Yuzhno-Sakhalinsk: Dalnauka, 2015. P. 41–45 (in Russian).

5. Архипова Е.В., Жигалин А.Д., Гусева И.С. Временные вариации сейсмичности как индикатор системного сейсмогеодинамического развития регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2016. № 1 (33). С. 3–11.

Arkipova E.V., Zhigalin A.D., Guseva I.S. Temporary variations of seismicity as an indicator of the systemic seismic-geodynamic development of the regions of Eastern Siberia and the Far East // Bulletin of the International University of Nature, Society and Man «Dubna». 2016. № 1 (33). P. 3–11 (in Russian).

6. Родников А.Г., Забаринская Л.П., Рашидов В.А., Сергеева Н.А. Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф активных континентальных окраин. М.: Научный мир, 2014. 172 с.

Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Rashidov V.A., Sergeeva N.A. Geodynamic models of regions deep structure of active continental margins natural disasters. M.: Nauchnyj mir, 2014. 172 p. (in Russian).

7. Архипова Е.В., Жигалин А.Д. Системное взаимодействие оболочек литосферы Тихоокеанского активного пояса // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии: сборник материалов L Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2018. С. 18–22.

Arkipova E.V., Zhigalin A.D. System interaction of the shells of the lithosphere of the Pacific active belt // Problems of tectonics and geodynamics of the Earth's crust and mantle: collection materials L Tectonic meeting. Volume 1. M.: GEOS, 2018. P. 18–22 (in Russian).

8. USGS Catalog of Geological survey of the USA [Electronic resource]. URL: <http://earthquake.usgs.gov> (date of access: 18.02.2019).