

О. А. Кучай¹, Н. А. Бушенкова¹*

Сейсмотектонические деформации в районе Японских островов

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: kuchayOA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Анализируются особенности деформирования погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты по данным механизмов очагов землетрясений ($4.7 \leq M_w \leq 9.0$). Район исследований включает острова Хонсю и Хоккайдо и окружающие их территории. Расчет сейсмотектонических деформаций выполнен по данным о механизмах очагов 3203 землетрясений. Выявлено, что погружение осей максимального девиаторного укорочения в слое земной коры 1-35 км в западных частях островов Хонсю и Хоккайдо осуществляется к востоку и юго-востоку, а в восточных – к западу, в соответствии с направлением смещения литосферных плит. В слое 35-70 км погружение осей укорочения происходит преимущественно к западу, в самом нижнем слое 400-600 км – к востоку. Неустойчивость в направлениях погружения осей укорочения отмечена в диапазоне глубин 70-400 км.

Ключевые слова: механизм очагов землетрясений, Охотоморская литосферная плита, Амурская литосферная плита, Филиппинская литосферная плита, Тихоокеанская литосферная плита, сейсмичность

O. A. Kuchay¹, N. A. Bushenkova¹*

Seismotectonic deformations in the area of the Japanese islands

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
*e-mail: KuchayOA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The deformation features of the subducting Pacific lithospheric plate are analyzed according to the earthquake foci mechanisms data ($4.7 \leq M_w \leq 9.0$). The study area includes the Honshu and Hokkaido islands and their surrounding areas. The calculation of seismotectonic deformations was performed on the 3203 earthquakes focal mechanisms data. It was revealed that the deviatoric maximal shortening axes in the 1-35 km layer of the earth's crust are immersed to the east and south-east in the western parts of the Honshu and Hokkaido islands, and in the eastern parts - to the west in accordance with the lithospheric plates displacements directions. In the 35-70 km layer, the shortening axes dip mainly to the west, in the lowest layer of 400-600 km - to the east. Instability in the dip directions of the shortening axes is observed in the depth range of 70-400 km.

Keywords: earthquake foci mechanism, Okhotsk lithospheric plate, Amur lithospheric plate, Philippine lithospheric plate, Pacific lithospheric plate, seismicity

Введение

В данной работе рассматривается характер деформирования Тихоокеанской литосферной плиты по данным о механизмах очагов землетрясений в районе Японских островов Хоккайдо и Хонсю. Надо отметить, что исследуемая территория включает зоны конвергентных границ Тихоокеанской плиты с Охотомор-

ской (Северо-Американской) и Филиппинской плитами, Филиппинской с Амурской. Сегменты Тихоокеанской плиты контактируют с Охотоморской плитой в зоне погружения под о. Хоккайдо и с Амурской плитой при погружении под северную часть о. Хонсю (рис. 1). Границу Охотоморской плиты в южной части в одних исследованиях проводят через о. Хонсю [1, 2], в других – через о. Хоккайдо [3]. Наклонный кластер скопления гипоцентров в южной части профиля AA_1 в интервале глубин 300-500 км маркирует фрагмент Тихоокеанского слэба, полого погружающегося под Филиппинскую плиту.

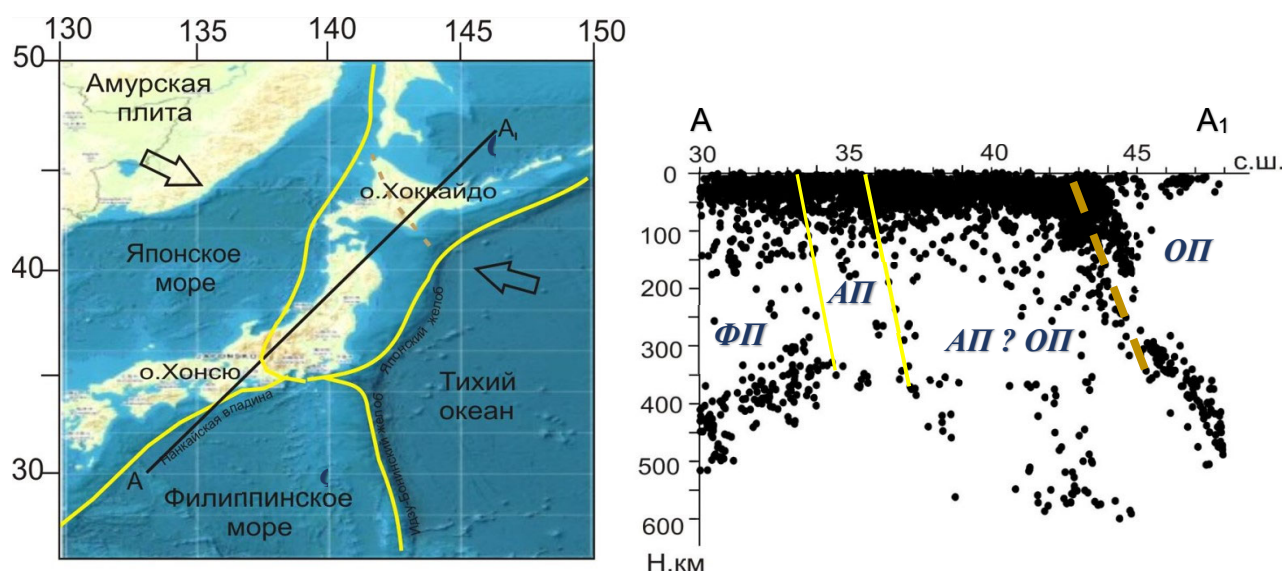


Рис. 1. Карта зон конвергентных границ Тихоокеанской плиты с Охотоморской (ОП), Филиппинской (ФП) и Амурской (АП), границы плит согласно [1, 2] показаны сплошными желтыми линиями, пунктирной линией – предполагаемая граница ОП согласно [3], стрелками – направления смещения плит [4]. Справа представлено распределение гипоцентров вдоль отмеченного на карте профиля AA_1 , гипоцентры показаны черными точками

Методы исследования

Ранее были опубликованы результаты определения полей напряжений для Японии [5-9]. В настоящей работе анализируются поля деформаций, полученные по данным о механизмах очагов. Для этого привлекались землетрясения с $4.7 \leq M_w \leq 9.0$ из каталогов Международного сейсмологического центра ISC [<http://www.isc.ac.uk>] за период наблюдений с 1976 года по сентябрь 2022 года. Расчет сеймотектонических деформаций (СТД) проводился в соответствии с программным кодом [10], где использованы методики [11-14], с учетом величины сейсмического момента каждого землетрясения. Для района с координатами $30-48^\circ$ с.ш. и $126-148^\circ$ в.д. размер площадок осреднения выбран в 1° по широте и долготе. Расчеты компонент деформаций для ячеек осреднения осуществлялись методом скользящего окна с шагом 0.5° . В пределах каждой ячейки получены ориентация осей максимальных девиаторных укорочений и удлинений,

величины компонент E_{xx} , E_{yy} и E_{zz} в географической системе координат и построены карты максимальных значений СТД, на которых для каждой ячейки выбирались E_{xx} , E_{yy} с наибольшими значениями деформаций по абсолютной величине.

Для выявления особенностей распределения сейсмических событий в погружающейся субдуцирующей Тихоокеанской плите проанализированы распределения 5840 землетрясений с $M \geq 5$ по глубине, построенные вдоль субмеридионального профиля по данным каталогов Международного сейсмологического центра за период наблюдения 1970–2022 гг. (рис. 1). На рис. 1 отчетливо выделяется зона от 200 до 400 км глубины, где наблюдается спад сейсмической активности с $M \geq 5$. В этом диапазоне глубин плотность слабых сейсмических событий также значительно ниже, чем в других слоях погружающейся плиты. Поэтому важно проследить ориентацию осей максимальных девиаторных укорочений и удлинений СТД в интервалах глубин: 1-35, 35.1-70, 70.1-105, 105.1-200, 200.1-300, 300.1-400 и 400.1-600 км.

Восстановление поля СТД осуществлялось по данным о механизмах очагов 3203 землетрясений (M_w 4.8-9), зарегистрированных в районе исследования на глубинах 1-600 км.

Результаты и обсуждение

Построенные распределения показывают, что погружение осей максимального девиаторного укорочения в слое земной коры 1-35 км в западных частях островов Хонсю и Хоккайдо осуществляется к востоку и юго-востоку, а в восточных – к западу (рис. 2).

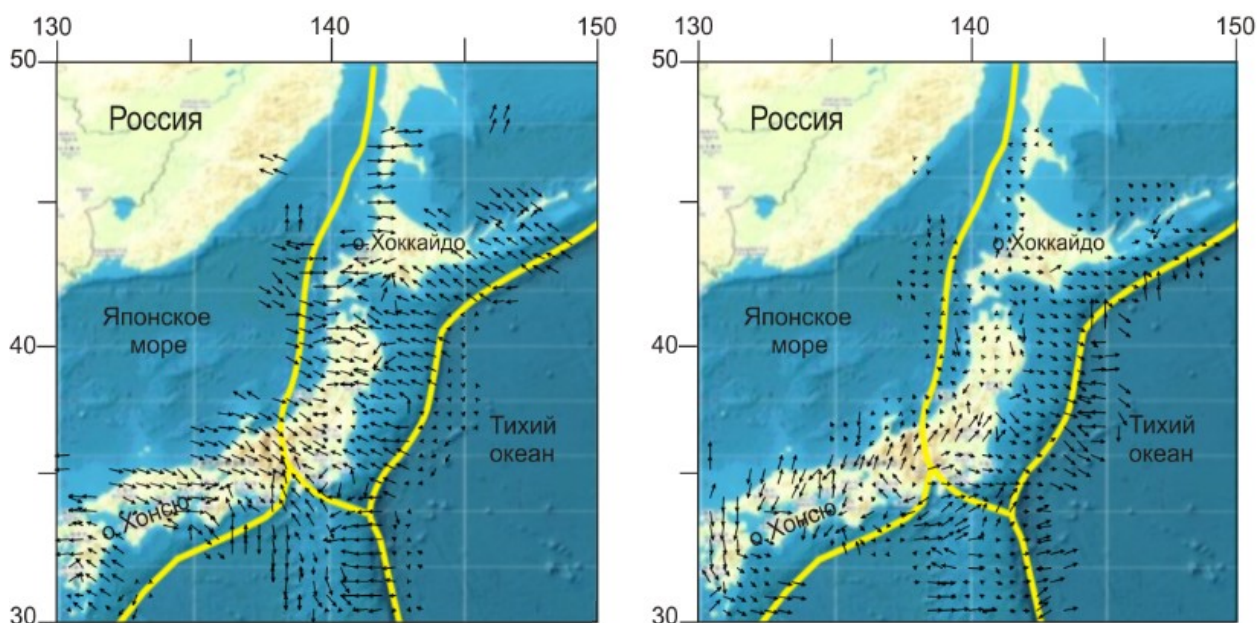


Рис. 2. Направления погружения осей максимального девиаторного укорочения (А) и удлинения (Б) по механизмам очагов землетрясений в слое 1-35 км с $M \geq 4.8$ за период с 1976 года по сентябрь 2022 года, длина стрелки зависит от угла наклона к горизонту, точки соответствуют близвертикальному положению осей

В слое 35-70 км погружение осей происходит только к западу, за исключением южной части острова Хонсю, отделенной границей Охотоморской плиты. Начиная с глубины 70 км (рис. 3), ориентация осей занимает разные азимутальные направления вплоть до глубины 300 км (рис. 4).

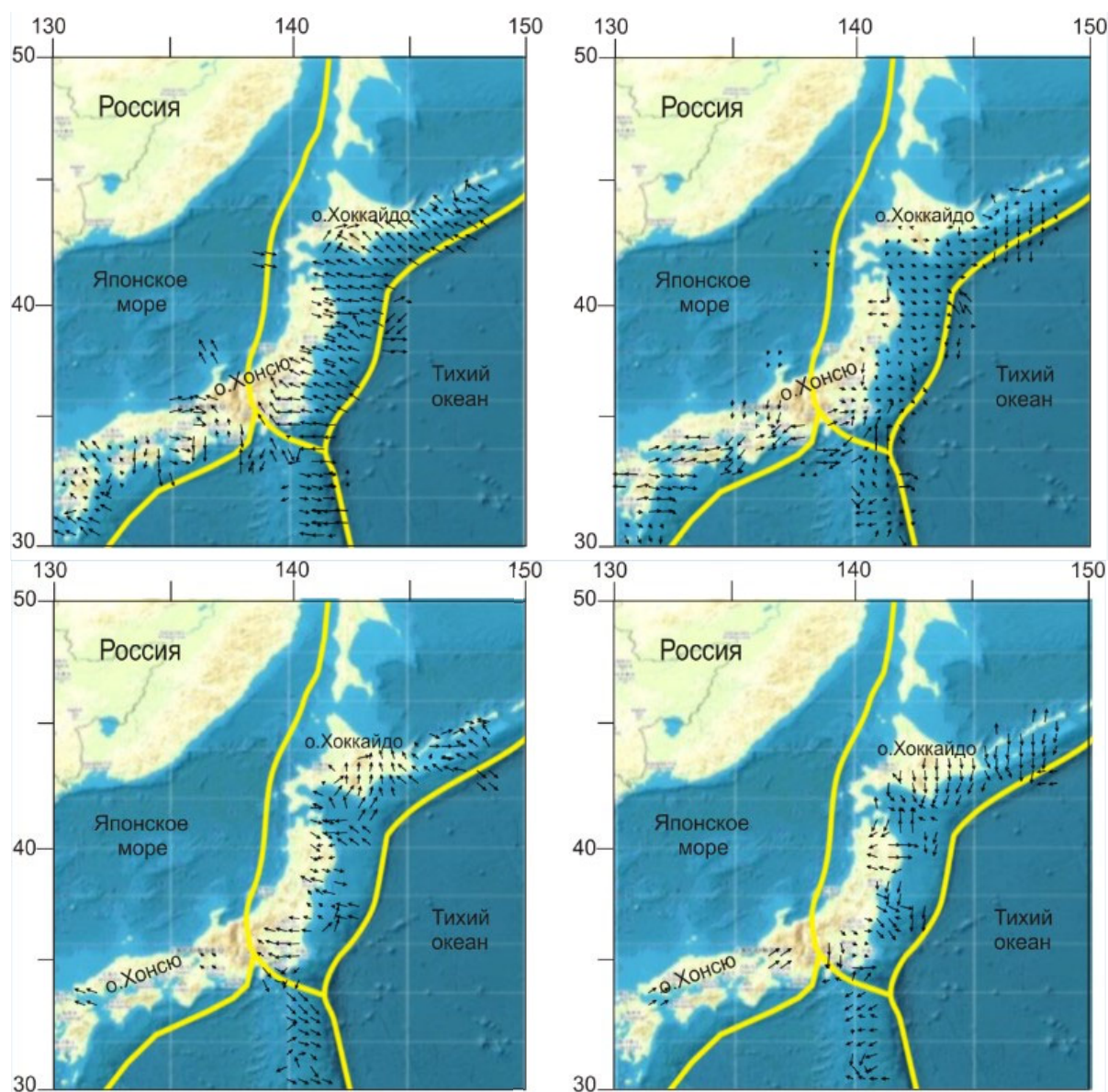


Рис. 3. Направления погружения осей максимального девиаторного укорочения (А) и удлинения (Б) по механизмам очагов землетрясений в интервалах 35.1-70 км (верхний ряд) и 70.1-105 км (нижний ряд) с $M \geq 4.8$ за период с 1976 года по сентябрь 2022 года, длина стрелки зависит от угла наклона к горизонту, точки соответствуют близвертикальному положению осей

С дальнейшим увеличением глубины в диапазоне 300-400 и 400-600 км ориентация осей укорочения стабилизируется и происходит их погружение к востоку (рис. 5). Ориентация осей максимального девиаторного удлинения имеет менее устойчивое распределение.

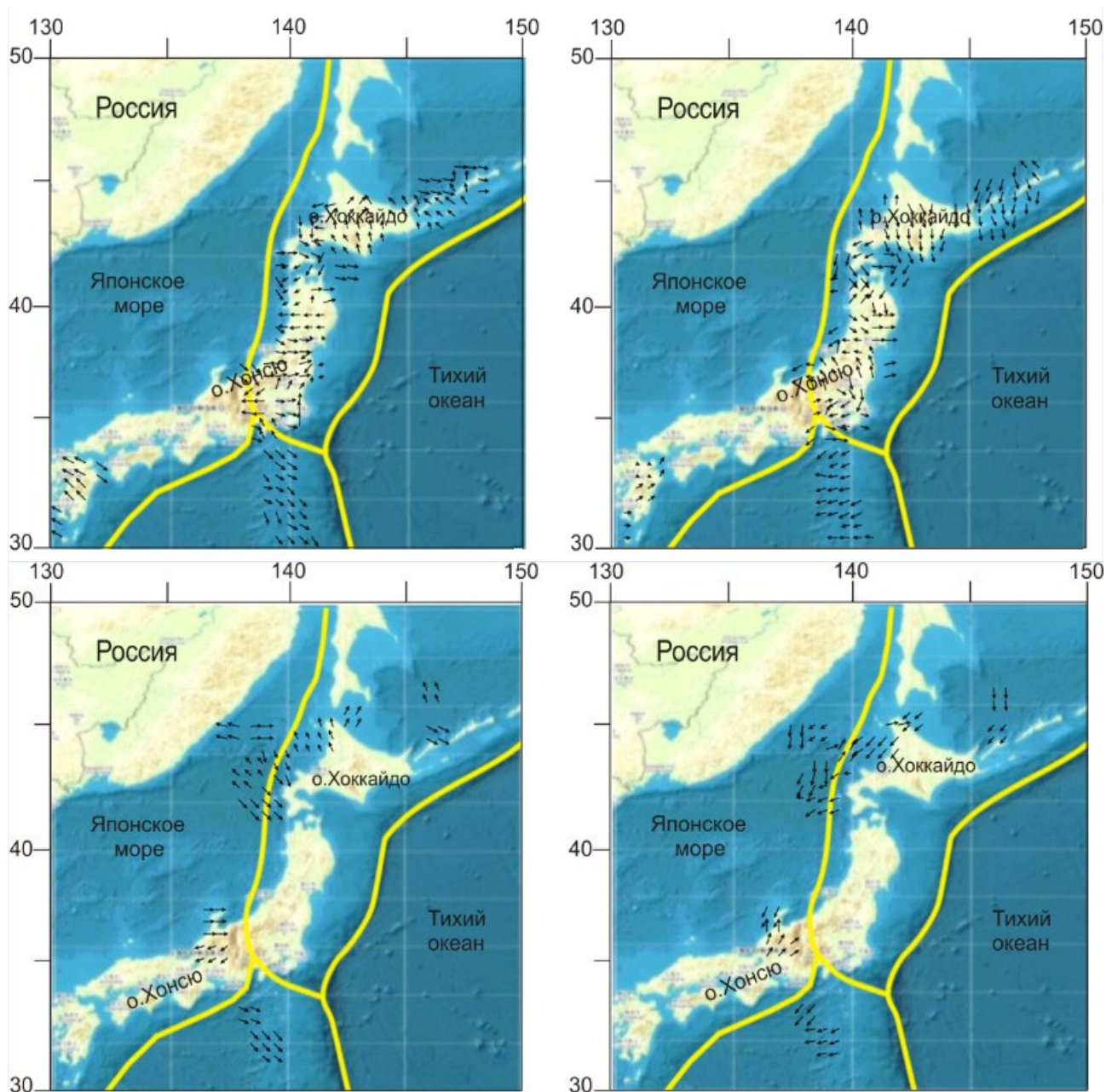


Рис. 4. Направления погружения осей максимального девиаторного укорочения (А) и удлинения (Б) по механизмам очагов землетрясений в интервалах 105.1-200 км (верхний ряд) и 200.1-300 км (нижний ряд) с $M \geq 4.8$ за период с 1976 года по сентябрь 2022 года, длина стрелки зависит от угла наклона к горизонту, точки соответствуют близвертикальному положению осей

Анализ максимальных значений СДД по двум диагональным компонентам (E_{xx} , E_{yy}) для глубин 0-35 км показал, что наибольшее значение имеют деформации широтного укорочения, и вдоль желоба узкой полосой протягивается область максимального широтного удлинения (рис. 6).

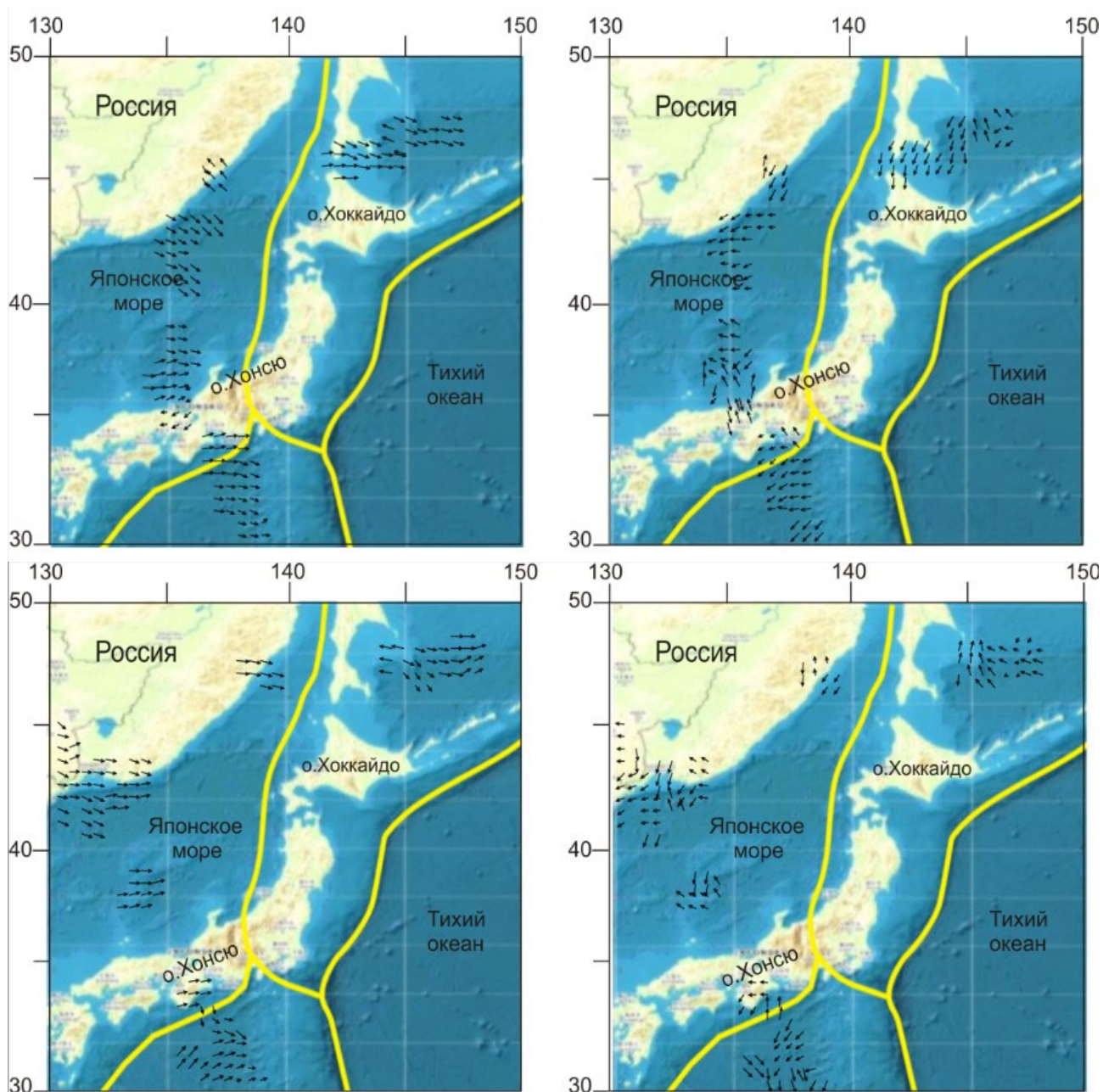


Рис. 5. Направления погружения осей максимального девиаторного укорочения (А) и удлинения (Б) по механизмам очагов землетрясений в интервалах 300.1-400 км (верхний ряд) и 400.1-600 км (нижний ряд) с $M \geq 4.8$ за период с 1976 года по сентябрь 2022 года, длина стрелки зависит от угла наклона к горизонту, точки соответствуют близвертикальному положению осей

Области максимальных широтных укорочений занимают основные площади в слое 35-70 км, а максимального широтного удлинения присутствуют только в южной части о. Хонсю.

В диапазонах глубин 105-200, 200-300 300-400 км происходит чередование объемов горных масс с максимальными положительными и отрицательными значениями по компонентам E_{xx} , E_{yy} .

В нижнем слое 400-600 км выявлено преимущественное широтное укорочение (рис. 6).

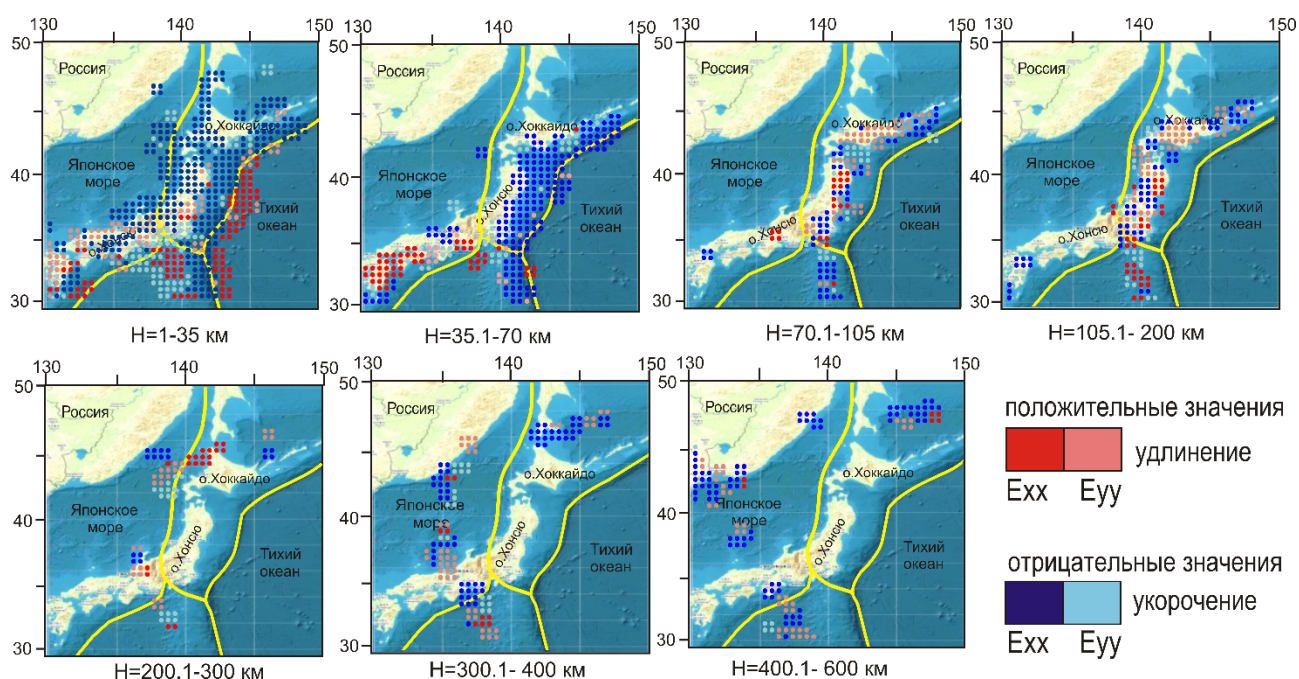


Рис. 6. Карта максимальных значений по абсолютной величине одной из двух компонент (E_{xx} , E_{yy}) тензора сейсмостектонических деформаций в каждой ячейке для диапазонов глубин (H) 1-35, 35-70, 70-105, 105-200, 200-300, 300-400 и 400-600 км за период с 1976 года по сентябрь 2022 года в зоне Беньофа в районе островов Хоккайдо и Хонсю

Анализ полученных распределений позволяет заключить, что погружение осей максимального девиаторного укорочения в слое 1-35 км осуществляется в западном и восточном направлении и граница между ними прослеживается через центральные части островов Хоккайдо и Хонсю. Эти данные согласуются с материалами по данным GPS, где Амурская плита смещается в восточном направлении, а Тихоокеанская в западном [3, 4]. Азимутальное направление погружения осей главных деформаций совместно с величинами максимальных горизонтальных осей свидетельствует о том, что деформации объемов горных масс на глубинах 35-70 км сохраняют направление погружения, характерное для восточной части островов. Неустойчивость в направлении погружения осей укорочения в последующих слоях (70-400 км) свидетельствует об изменениях физических свойств литосферы с глубиной. Так, слои в интервалах 1-70 и 400-600 км сокращаются в субширотном направлении, чего нельзя однозначно сказать о слоях в интервале 70-400 км. Авторы работы [15] предполагают, «...что землетрясения в диапазоне от 10-15 до 200-250 км реализуются, в целом, в соответствии с флюидометаморфогенной моделью сейсмогенеза. Можно предположить, что землетрясения, происходящие глубже 200-250 км, описываются фазовой моделью глубоких землетрясений». В нашем случае изменения в полях СТД фиксируются до

400 км, что, вероятно, обусловлено изменением физических свойств литосферы под влиянием мантийной конвекции. В работах [5-9] оценена ориентация главных осей напряжений и сопоставление с СТД указывает на согласованность результатов в целом, различаясь в деталях.

Стоит также отметить, что в диапазоне глубин 70-200 км действительно, как в распределении землетрясений и направлений погружения осей максимальных девиаторных укорочений/удлинений, так и в поле максимальных значений СТД в южной части о. Хоккайдо наблюдается граница, которую можно интерпретировать, как границу Охотоморской литосферной плиты (отмечена пунктирной линией на рис. 1). Таким образом, Амурская плита на участке южнее этой границы и до контакта с Филиппинской плитой может непосредственно контактировать с субдуцирующей Тихоокеанской литосферной плитой. Кроме того, нельзя исключать возможность существования на этом участке не продолжения Амурской, а обособленной малой плиты, образовавшейся в результате тектонических процессов в ходе эволюции этого участка Тихоокеанской зоны субдукции.

Заключение

Расчет распределений сейсмотектонических деформаций в зоне Беньофа Тихоокеанской плиты в районе островов Хонсю и Хоккайдо выполнен по данным о механизмах очагов региональных землетрясений. Анализ полученных распределений показывает, что погружение осей максимального девиаторного укорочения в слое земной коры в исследуемом регионе осуществляется в западном и восточном направлениях относительно границы, проходящей через центральные части о. Хоккайдо и о. Хонсю. Эти данные согласуются с материалами по данным GPS. Распределение направленности осей главных деформаций совместно с величинами максимальных горизонтальных осей свидетельствует том, что деформации объемов горных масс на глубинах 35-70 км сохраняют направление погружения, характерное для восточной части островов. Неустойчивость в направлении погружения осей укорочения в нижележащих слоях свидетельствует об изменениях физических свойств литосферы с глубиной, вероятно, под влиянием сложной структуры мантийной конвекции в зоне субдукции.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проектов ФНИ FWZZ-2022-0021 и FWZZ-2022-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Savostin L., Zonenshain L., Baranov B. Geology and plate tectonics of the Sea of Okhotsk // T.W.C. Hilde and S. Uyeda (Eds.), Geodynamics of the Western Pacific-Indonesian region. Geodyn. Ser. – 1983. – Vol. 11. – P. 189-221.
2. Cook D.B., Fujita K., and McMullen C.A. Present-day interactions in northeast Asia: North American, Eurasian and Okhotsk plates // J. Geodyn. – 1986. – Vol. 6. – P. 33-51.
3. Seno T. and Sakurai T. Can the Okhotsk plate be discriminated from the North American plate? // Journal of Geophysical Research. – 1996. – Vol. 101(b5). – P. 11305-11315.

4. Apel E.V., Buřrgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R. and Prytkov A. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // *Geophys. Res. Lett.* – 2006. – Vol. 33. – article L11303.
5. Christova C., Tsapanos T. Depth distribution of stresses in the Hokkaido Wadati-Benioff zone as deduced by inversion of earthquake focal mechanisms // *Journal of Geodynamics.* – 2000. – Vol. 30(5). – P. 557–573.
6. Christova C., Hirata N., Kato A. Contemporary Stress Field in the Wadati-Benioff Zone at the Japan-Kurile Arc-Arc Junction (North Honshu, the Hokkaido Corner and Hokkaido Island) by Inversion of Earthquake Focal Mechanisms // *Bulletin of the Earthquake Research Institute.* – 2006. – Vol. 81. – P. 1–18.
7. Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 // *Геодинамика и тектонофизика.* – 2014. – №5(2). – С. 469–506.
8. Сафонов Д.А. Пространственное распределение тектонических напряжений в южной глубокой части Курило-Камчатской зоны субдукции // *Геосистемы переходных зон.* – 2019. – №3(2). – С. 175–188.
9. Сафонов Д.А. Реконструкция поля тектонических напряжений глубокой части южного сегмента Курило-Камчатской и северного сегмента Японской зоны субдукции // *Геодинамика и тектонофизика.* – 2020. – №11(4). – С. 743–755.
10. Благовидова Т.Я., Кучай О.А., Мельник Е.А., Провоторов Н.В. Программа Defor-1 для восстановления приращения сейсмостектонических деформаций по данным механизмов очагов землетрясений и приращения полей деформаций по данным космической (GPS) геодезии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022682977 от 29.11.2022 г.
11. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
12. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 176 с.
13. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. – М.: Академкнига, 2007. – 406 с.
14. Bushenkova N.A., Kuchay O.A. Focal Mechanisms of Earthquakes in the Subduction Zone of the Western Pacific Plate. // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2022. – Vol. 13(3). – article 0639.
15. Родкин М.В., Рундквист Д.В. Геофлюидогеодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Интеллект, 2017. – 288 с.

© О. А. Кучай, Н. А. Бушенкова, 2023