

УДК 528:551.242

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ****Серов М.А., Жижерин В.С.***ФГБУН «Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук», Благовещенск, e-mail: serov@ascnet.ru*

Настоящая статья посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния земной коры Верхнего Приамурья на основе геологических, сейсмических, геофизических данных и результатов исследований методами космической геодезии. Основными этапами данной работы явились: разработка математической модели разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья и выполнение численного моделирования напряженно-деформированного состояния земной коры Верхнего Приамурья. Наиболее точной геомеханической моделью оказалась модель с заданными генеральными разломами и разделением блоков на более пластичные и более жесткие. Полученные результаты моделирования, в пределах рассматриваемой системы блоков Верхнего Приамурья, показывают, что современные напряжения концентрируются в двух зонах: первая – в юго-восточной части Селенга-Станового блока вдоль Северо-Турингского разлома, вторая – в Становой зоне с переходом в Тынденско-Зейский блок вдоль Джелтулакского разлома. Практическое значение подобного численного моделирования заключается в выявлении зон повышенной концентрации современных напряжений, которые при разрядке могут вызвать катастрофические сейсмические события.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, земная кора, Верхнее Приамурье

**SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE CRUST OF THE UPPER AMUR****Serov M.A., Zhizherin V.S.***Federal state budgetary institution of science Institute of Geology and nature management for Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, e-mail: serov@ascnet.ru*

The present article is devoted to modeling the stress-strain state of the Earth's crust of the Upper Amur region on the basis of geological, seismic, geophysical data and research results using the methods of space geodesy. The main stages of this work were: the development of a mathematical model of fault-block structures of the Upper Amur region and the numerical simulation of the stress-strain state of the Upper Amur River crust. The most accurate geomechanical model turned out to be a model with given general faults and division of blocks into more plastic and more rigid ones. The obtained modeling results, in the framework of the system of blocks of the Upper Amur region, show that the current stresses are concentrated in two zones: the first in the southeastern part of the Selenga-Stanovoi block along the North-Turingrsky fault, the second in the Stanovoi zone with the transition to the Tynda-Zeya block along the Dzheltulak fault. The practical significance of such a numerical simulation lies in the detection of zones of increased concentration of modern stresses, which, when disassembled, can cause catastrophic seismic events.

**Keywords:** mathematical modeling, stress-strain state, the earth's crust, the Upper Amur region

Территория Верхнего Приамурья находится в северо-восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса, в котором рядом авторов [1–6] выделяется Амурская литосферная плита. Исследуемая территория характеризуется наличием множества сейсмоактивных разломов. Кинематика разломных зон и характер современных тектонических деформаций в пределах данной территории изучены недостаточно. Основная информация получена по данным о механизмах очагов землетрясений. Данные о современных вертикальных движениях не дают полного представления о происходящих деформационных процессах. Великое японское землетрясение 11 марта 2011 г. Mw = 9.0 [7] и целая серия последующих землетрясений (14 октября 2011 г., район г. Сковородино [8], и более 30 афтершоков с магнитудой от 2,4 до 4,4) вдоль границ Амурской литосферной плиты ярко продемонстрировало необходимость и актуаль-

ность изучения современных геодинамических процессов данного региона.

Сейсмической опасности здесь могут быть подвержены города Тынды, Зея, Сковородино и другие, но наибольшую опасность последствиями землетрясений представляют: Зейская ГЭС, нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий океан», строящийся газопровод «Сила Сибири», федеральные автодороги «Амур» (Чита – Хабаровск) и «Лена» (Тында – Якутск).

Сложное геологическое строение и повышенный уровень сейсмичности исследуемого региона пространственно совмещены с максимальными величинами отклонения векторов по азимуту и величине, это говорит о том, что на неотектоническом этапе на территории Верхнего Приамурья представлены различные геодинамические режимы. Подтверждением этому служит разнообразие механизмов очага землетрясений, зафиксированных на исследуемой территории.

### Материалы и методы исследования

В настоящее время имеются достаточно подробные карты разломной тектоники юга Дальнего Востока России [9] и каталоги инструментальных наблюдений за сейсмическими событиями [10], что дает возможность определить начальную конфигурацию блоков земной коры и механизмов очагов землетрясений. Для определения современного напряженно-деформированного состояния блоковых структур земной коры Верхнего Приамурья были использованы методы численного моделирования тектонических движений [11].

При контактном взаимодействии тектонических блоков земной коры поставленная задача решалась с учетом физической нелинейности ввиду необратимости деформационных процессов. В связи с длительностью протекания геологических процессов, напряженно-деформированное состояние блоков земной коры определяется численным решением квазистатических уравнений механики деформируемого твердого тела [11]. Для дискретизации уравнений механики деформируемого твердого тела использовался метод конечных элементов, который является оптимальным для решения задач численного моделирования тектонических процессов, связанных со значениями больших деформаций. Задача напряженно-деформированного состояния блоков геологической среды решалась в текущей лагранжевой формулировке с учетом геометрической нелинейности деформационных процессов:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta d_{ij} dV = \int_{S_T} T_i \delta v_i dS$$

для любого  $\delta v_i$  ( $\delta v_i = 0$  на  $S_v$ ),

где  $\sigma_{ij}$ ,  $d_{ij}$  – тензор напряжения Коши и тензор скорости деформаций;  $v_i$  – вектор скорости;  $V$  – объем, занимаемый телом;  $S$  – поверхность тела;  $S_v$ ,  $S_T$  – части поверхности тела  $S$ , на которых заданы компоненты векторов скорости перемещений  $v_i$  и напряжений  $T_i$ ;

Связь тензора скорости деформаций с тензором градиента скорости описывается уравнением

$$d_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}).$$

Для решения поставленной задачи производилось пошаговое интегрирование исходных уравнений с итерационным уточнением решения методом Ньютона – Рафсона.

Построение геомеханической модели разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья и численное моделирование напряженно-деформированного состояния проводились с помощью пакета ANSYS в трехмерной постановке.

### Результаты исследования и их обсуждение

На основе имеющихся геологических и тектонических данных [1, 4–6, 9] в исследуемой области Верхнего Приамурья были выделены восемь блоков земной коры (рис. 1): Становой ПЗ (восточная и западная часть), Сутамский, Ларбинский, Тынденско-Зейский, Селенга-Становой, Монголо-Охотский складчатый пояс, Аргуно-Мамынский. Границы данных блоков совпадают с тектоническими разломами.

Для каждого из блоков земной коры Верхнего Приамурья была создана геомеханическая модель, включающая в себя: конечно-элементную сетку с определенным типом элементов и набором значений реологических параметров. В качестве конечного элемента для всех блоков были выбраны 4-узловые изопараметрические параллелепипеды, применяемые для описания напряженно-деформированного состояния геосреды. Для задания геомеханических свойств блоков были заданы значения модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ :  $E = 17$  ГПа,  $\nu = 0,25$ .

В рассматриваемой математической модели сдвиг моделировался заданными перемещениями внешних границ краевых блоков. Скорость перемещений этих границ задавалась на основе поля смещений тектонических блоков, полученного методом космической геодезии из работ [12, 13]. На тех участках исследуемой области, где кинематические условия не заданы, ставились граничные условия Винклера, соответствующие упругой реакции внешней среды.

Моделируемая область представляет собой чередование зон поднятий и депрессий, которое выражается в сочетании более пластичных Монголо-Охотского складчатого пояса, Тынденско-Зейского блока и более жестких блоков Сутамский, Ларбинский, Селенга-Становой, Аргуно-Мамынский, Становой ПЗ. В связи с чем, в расчетной модели использовались два разных предела текучести материала. Предел текучести 51 МПа соответствовал более пластичным, а 78 МПа – более жестким. Такой выбор реологических параметров объясняется разным составом пород.

СХЕМА РАЗЛОМНОЙ ТЕКТОНИКИ

Масштаб 1 : 2 500 000

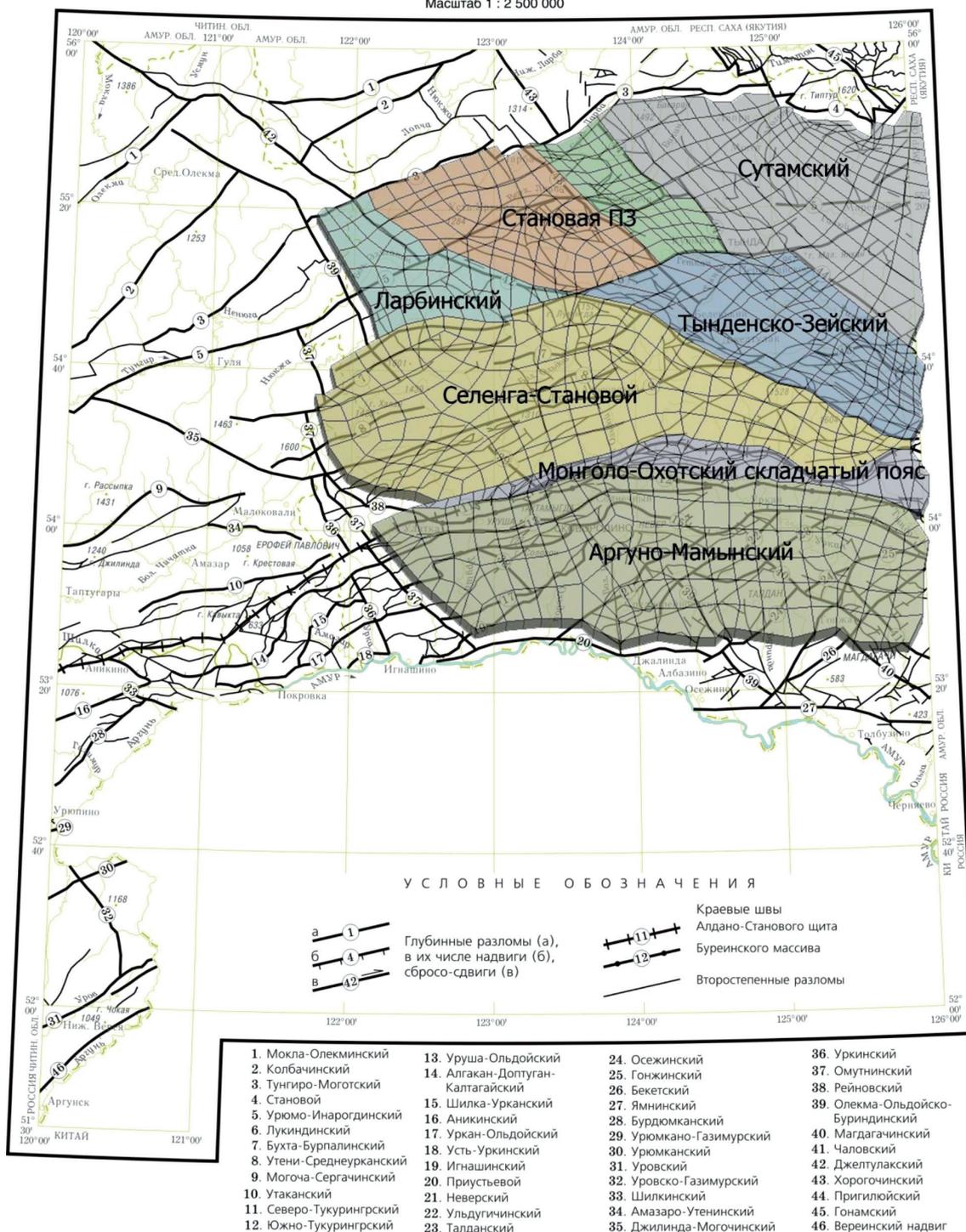


Рис. 1. Схема разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья на основе Государственной геологической карты N51 [9]

Первоначально было опробовано несколько расчетных схем деформирования блоков и выделен один вариант с наличием генеральных разломов, проходящих по Джелтулакскому и Тукурингрскому разломам, разделяю-

щих три тектонические структуры с разными реологическими свойствами. В данной модели межблоковые взаимодействия задавались как отсутствие проскальзывания между всеми блоками, за исключением «генеральных

разломов», где задавалось трение по закону Кулона – Мора с коэффициентом равным 0,7.

Другой независимой характеристикой модели является величина толщины земной

коры. В рамках приближения плоского напряженного состояния толщина элементов, моделирующих кору, задавалась для всего региона равной 40 км.

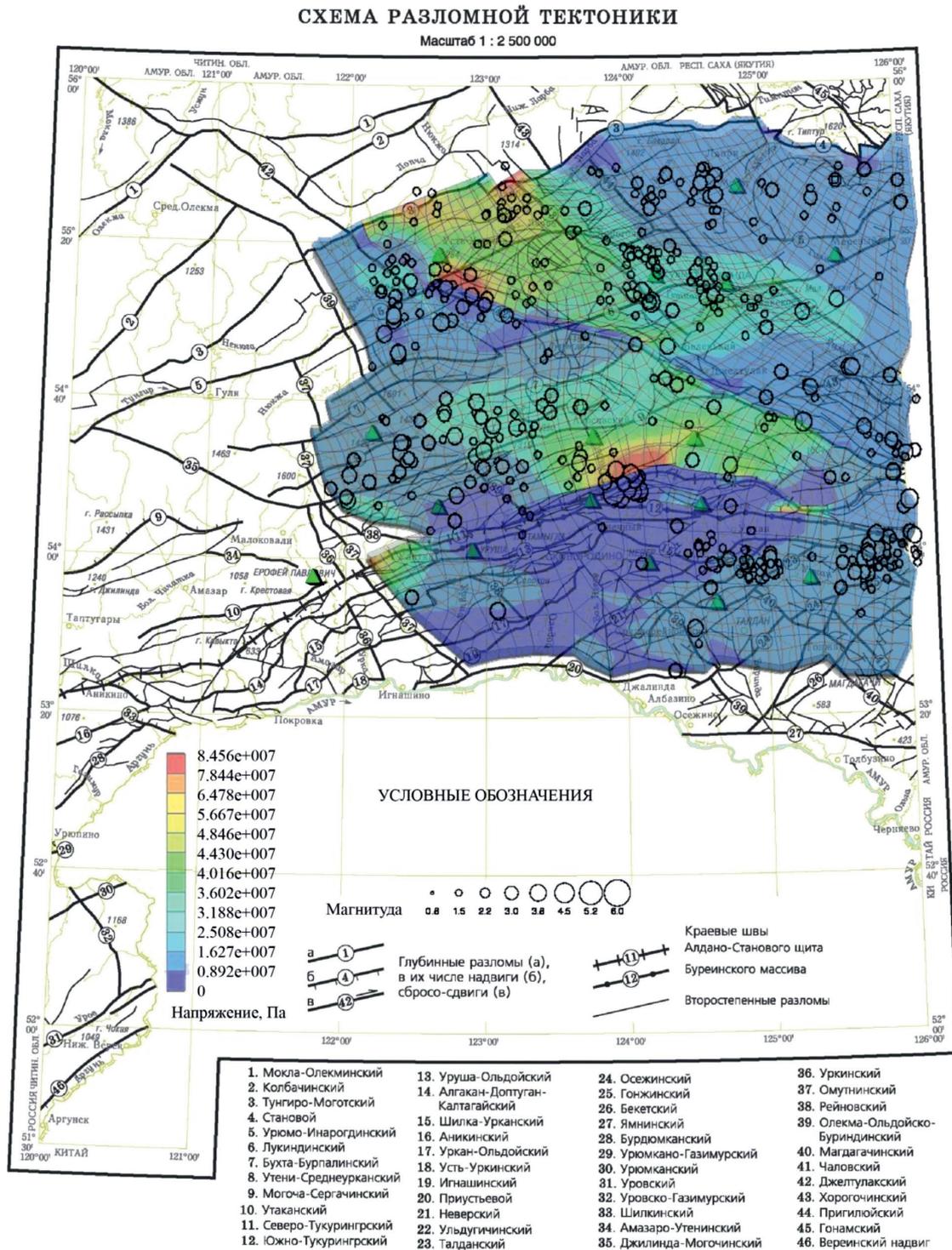


Рис. 2. Схема напряжено-деформированного состояния разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья на основе Государственной геологической карты N51 [9]

Полученные результаты современных движений позволяют заключить, что районы максимальной дисперсии векторного поля скоростей пространственно совмещены с зонами повышенной сейсмичности, что говорит о современной активности существующих блоковых структур (рис. 2).

### Заключение

Приведенные материалы свидетельствуют о том, что современная геодинамика разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья во многом определяется движениями, происходящими вдоль границы Евразийской и Амурской литосферных плит.

Для оценки состояния напряженно-деформированного состояния разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья наиболее точной геомеханической моделью оказалась модель с заданными генеральными разломами, проходящими по Джелтулакскому и Тукурингскому разломам, а также с заданным разделением блоков на более пластичные: Монголо-Охотский складчатый пояс, Тынденско-Зейский и на более жесткие: Сутамский, Ларбинский, Селенга-Становой, Аргуно-Мамынский, Становой ПЗ, что подтверждается данными GPS-наблюдениями.

По данным результатам моделирования современные напряжения земной коры Верхнего Приамурья концентрируются в двух зонах. Первая зона расположена в юго-восточной части Селенга-Станового блока вдоль Северо-Турингского разлома, вторая – в Становой ПЗ с переходом в Тынденско-Зейский блок вдоль Джелтулакского разлома. Данные зоны характеризуются повышенным уровнем сейсмических событий.

Практическое значение подобного численного моделирования заключается в выявлении зон повышенной концентрации современных напряжений, которые при разрядке могут вызвать катастрофические сейсмические события.

*Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 17-55-53110).*

### Список литературы

1. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. – М.: Недра, 1990. – Кн. 1. – 326 с. – Кн. 2. – 334 с.
2. Wei D., Seno T. Determination of the Amurian plate motion // *Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia* / Eds. M. Flower, S. Chung, C. Lo, T. Lee. – 1998. – P. 337–346.
3. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгагов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофе-

ев В.Ф. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // *Тихоокеанская геология*. – 2003. – Т. 22, № 6. – С. 7–41.

4. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // *Геотектоника*. – 2004. – № 1. – С. 3–20.

5. Мальшев Ю.Ф., Подгорный В.Я., Шевченко Б.Ф., Н.П. Романовский, Каплун В.Б., Горнов П.Ю. Глубинное строение структур ограничения амурской литосферной плиты // *Тихоокеанская геология*. – 2007. – Т. 26, № 2. – С. 3–17.

6. Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика Амурской плиты по данным GPS-геодезии // *Геология и геофизика*. – 2011. – Т. 52, № 2. – С. 299–311.

7. Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Bykov V.G., Luneva M.N., Bormotov V.A., Gerasimenko M.D., Kolomiets A.G., Baek J., Park P.H., Serov M.A. Analysis of the far-feld crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // *Tectonophysics*. – 2012. – Т. 524–525. – P. 76–86.

8. Ханчук А.И., Сафонов Д.А., Коновалов А.В., Шестаков Н.В., Быков В.Г., Серов М.А., Сорокин А.А. Сильнейшее современное землетрясение в Верхнем Приамурье 14 октября 2011 г.: первые результаты исследования // *Доклады академии наук*. – 2012. – Т. 445, № 3. – С. 338–341.

9. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:1000000. Издание третье. Дальневосточная серия. Листы: N-51. – СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009.

10. International Seismological Centre, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013.

11. Бабичев А.В., Новиков И.С., Полянский О.П., Коробейников С.Н. Компьютерное моделирование деформирования земной коры горного Алтая в кайнозой // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50, № 2. – С. 137–151.

12. Жижерин В.С., Серов М.А. Кинематика современных тектонических движений в пределах восточной части Монголо-Охотского складчатого пояса // *Геология и геофизика*. – 2016. – Т. 57, № 12. – С. 2143–2152.

13. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Серов М.А., Селиверстов Н.И., Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дучков А.Д., Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Адрюков Д.Г. Начало формирования единой сети геодинамических наблюдений ДВО РАН // *Вестник ДВО РАН*. – 2009. – № 4. – С. 83–93.

### References

1. Zonenshajn L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. *Tektonika litosfernyh плит territorii SSSR*. M.: Nedra, 1990. Kn. 1. 326 p. Kn. 2. 334 p.
2. Wei D., Seno T. Determination of the Amurian plate motion // *Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia* / Eds. M. Flower, S. Chung, C. Lo, T. Lee. 1998. pp. 337–346.
3. Parfenov L.M., Berzin N.A., Hanchuk A.I., Badarch G., Belichenko V.G., Bulgatov A.N., Dril S.I., Kirillova G.L., Kuzmin M.I., Nokleberg U., Prokopev A.V., Timofeev V.F. Model formirovaniya orogennyh pojasov Centralnoj i Severo-Vostochnoj Azii // *Tihookeanskaja geologija*. 2003. T. 22, no. 6. pp. 7–41.
4. Gatinskij Ju.G., Rundkvist D.V. Geodinamika Evrazii tektonika плит i tektonika blokov // *Geotektonika*. 2004. no. 1. pp. 3–20.
5. Malyshev Ju.F., Podgornij V.Ja., Shevchenko B.F., N.P. Romanovskij, Kaplun V.B., Gornov P.Ju. Glubinnoe stroenie struktur ogranichenija amurskoj litosfernoj plyty // *Tihookeanskaja geologija*. 2007. T. 26, no. 2. pp. 3–17.

6. Ashurkov S.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Luhnev A.V., Sorokin A.P., Serov M.A., Byzov L.M. Kinematika Amurskoj plity po dannym GPS-geodezii // *Geologija i geofizika*. 2011. T. 52, no. 2. pp. 299–311.
7. Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Bykov V.G., Luneva M.N., Bormotov V.A., Gerasimenko M.D., Kolomiets A.G., Baek J., Park P.H., Serov M.A. Analysis of the far-feld crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // *Tectonophysics*. 2012. T. 524–525. pp. 76–86.
8. Hanchuk A.I., Safonov D.A., Kononov A.V., Shestakov N.V., Bykov V.G., Serov M.A., Sorokin A.A. Silnejshee sovremennoe zemletrjasenie v Verhnem Priamure 14 oktjabrja 2011 g.: pervye rezultaty issledovanija // *Doklady akademii nauk*. 2012. T. 445, no. 3. pp. 338–341.
9. Gosudarstvennaja geologicheskaja karta RF masshtaba 1:1000000. Izdanie trete. Dalnevostochnaja serija. Listy: N-51. SPb.: Kartfabrika VSEGEI, 2009.
10. International Seismological Centre, On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013.
11. Babichev A.V., Novikov I.S., Poljanskij O.P., Korobejnikov S.N. Kompjuternoje modelirovanie deformirovanija zemnoj kory gornogo Altaja v kajnozoe // *Geologija i geofizika*. 2009. T. 50, no. 2. pp. 137–151.
12. Zhizherin V.S., Serov M.A. Kinematika sovremennyh tektonicheskikh dvizhenij v predelakh vostochnoj chasti Mongolo-Ohotskogo skladchatogo pojasa // *Geologija i geofizika*. 2016. T. 57, no. 12. pp. 2143–2152.
13. Bykov V.G., Bormotov V.A., Kokovkin A.A., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Gerasimenko M.D., Shestakov N.V., Kolomiec A.G., Sorokin A.P., Sorokina A.T., Serov M.A., Seliverstov N.I., Maguskin M.A., Levin V.E., Bahtiarov V.F., Sankov V.A., Luhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Duchkov A.D., Timofeev V.Ju., Gornov P.Ju., Adrjukov D.G. Nachalo formirovanija edinoj seti geodinamicheskikh nabljudenij DVO RAN // *Vestnik DVO RAN*. 2009. no. 4. pp. 83–93.