

УДК 528:551.242(571.61/.62)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ НА ОСНОВЕ GPS ДАННЫХ****Жижерин В.С., Серов М.А., Холобуда С.П.***ФГБУН «Институт геологии и природопользования» Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Благовещенск, e-mail: serov@ascnet.ru*

В статье представлены результаты моделирования геодинамических процессов Верхнего Приамурья. Моделирование проводилось на основе проведенных авторами многолетних GPS наблюдений на геодинамическом полигоне, расположенном в области конвергенции Евразийской и Амурской литосферных плит, на западном крыле Байкальской рифтовой зоны. В пределах обозначенной территории происходит взаимодействие тектонических единиц Селенга-Станового и Монголо-Охотского орогенных поясов, Становой гранит-зеленокаменной области Алдано-Станового щита и Аргуно-Мамынского массива Центрально-Азиатского складчатого пояса. Изучаемая область представляет собой коллаж террейнов различных как по вещественному составу слагающих их пород, так и по своим механическим свойствам, выражающимся в различной степени тектонической жесткости и энергонасыщенности. Наблюдения на реперных пунктах проводились один раз в год в течение июля – августа, с целью исключения систематических ошибок, связанных с периодическими сезонными отклонениями в точности. В ходе обработки были использованы точные эфемериды спутников, навигационные данные, а также RINEX файлы станций международной сети IGS, необходимые для привязки регионального решения к глобальной системе отсчета ITRF2008. Используемый в работе подход заключался в получении при помощи программного комплекса Golden Software SURFER интерполированного поля скоростей, на основании которого было вычислено поле дивергенции. Полученные результаты с привлечением других геолого-геофизических данных позволили разработать геодинамическую модель территории Верхнего Приамурья, отображающую характер происходящих геодинамических процессов. Для исследуемой территории установлен вихревой характер геодинамических процессов, амплитуда которых на 2 порядка превышает типичные для внутриплитных областей значения. Обнаружена область смены знака доминирующих тектонических напряжений. Выявлена связь поля деформаций и сейсмичности.

**Ключевые слова:** Верхнее Приамурье, Амурская плита, моделирование геодинамических процессов, деформации земной коры

**MODELING OF GEODYNAMIC PROCESSES OF THE UPPER AMUR REGION  
BASED ON GPS DATA****Zhizherin V.S., Serov M.A., Kholobuda S.P.***Science federal state budgetary institution Institute of geology and environmental management  
of Far East office of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, e-mail: serov@ascnet.ru*

The article presents the results of geodynamic processes modeling in the Upper Amur region. The simulation was carried out on the basis of the long-term GPS observations made by the authors at the geodynamic range located in the convergence area of the Eurasian and Amur lithospheric plates on the western wing of the Baikal rift zone. Within the designated territory, there is interaction of tectonic units of the Selenga-Stanovoi and Mongolo-Okhotsk orogenic belts, the Stanovoi granite-greenstone area of the Aldan-Stanovoi Shield and the Argun-Mamynsky Massif of the Central Asian Fold Belt. The studied area is a collage of terranes of different types both in terms of the material composition of their constituents and in their mechanical properties, expressed in varying degrees of tectonic rigidity and energy saturation. Observations at the survey points were conducted once a year during July-August, in order to avoid systematic errors associated with periodic seasonal deviations in accuracy. During the processing, precise satellite ephemeris, navigation data, as well as RINEX files of the stations of the international IGS network, necessary for linking the regional solution to the global reference frame ITRF2008, were used. The approach used in the work consisted in obtaining an interpolated velocity field using the Golden Software SURFER software package, on the basis of which the divergence field was calculated. The obtained results involving other geological and geophysical data made it possible to develop a geodynamic model of the Upper Amur River area that reflects the nature of the geodynamic processes. For investigated territory is established the vortex character of geodynamic processes, amplitude of which is 2 orders of magnitude higher than the values typical for intraplate areas. The region of the sign change of the dominant tectonic stresses is found. The relationship between the deformation field and seismicity is revealed.

**Keywords:** Upper Amur region, Amur plate, modeling of geodynamic processes, deformation of the earth's crust

Согласно современным представлениям теории тектонических плит [1] земная кора поделена на относительно жесткие фрагменты (плиты) перемещающиеся с различной скоростью по астеносферному слою мантии. Природа сил, вызывающих эти перемещения, до конца не установлена,

однако считается, что главным движущим механизмом выступает мантийная конвекция, в ходе которой относительно тяжелая кора океанических плит погружается под более легкую кору континентов в зонах субдукции. В рифтовых зонах, где мантийная конвекция создает восходящие потоки

разогретого вещества, происходит процесс образования новой коры, обеспечивая тем самым стабильность размеров планеты.

Максимально установленные скорости субдукции и рифтообразования, в наиболее геодинамических активных областях планеты достигают первых десятков сантиметров год, в то время как типичные скорости смещения внутриплитных участков земной коры обычно не превышают первых десятков миллиметров в год [2].

Земная кора состоит из семи основных литосферных плит и такого же количества малых. Различают три типа границ и соответственно режимов взаимодействия плит: дивергентные границы, по которым происходит раздвижение плит, конвергентные – сближение, трансформные – скольжение одной плиты относительно другой.

Исследуемый в данной работе регион расположен в области конвергентного взаимодействия Евразийской и Амурской плит, является восточным обрамлением Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Согласно существующим данным [3], кинематика Евразийской и Амурской плит отличается незначительно, однако зона их сочленения отчетливо выражена в плотности разрывных нарушений и сейсмичности.

В данной работе, на основе полученных авторами в ходе полевых работ GPS-данных, представлены вычисленные скорости современных горизонтальных смещений земной коры исследуемого региона. На основе этих оценок, с привлечением других геолого-геофизических данных, была разработана геодинамическая модель территории Верхнего Приамурья, отображающая характер происходящих геодинамических процессов.

#### *Краткое описание исследуемого региона*

Тектоническое становление изучаемого региона принято связывать с начавшимся в протерозое, и продолжавшимся по разным оценкам [4] от поздней юры до раннего мела закрытием Монголо-Охотского океана. В ходе аккреции к Северо-Азиатскому кратону присоединялись различные по возрасту, составу, а также условиям формирования террейны, среди которых можно встретить раннедокембрийские метаморфические комплексы, позднеархейские гранито-гнейсы, фрагменты мезозойских офиолитов, габбро-гранитоидов и терригенно-вулканогенных толщ.

В геофизических полях [5] исследуемый регион характеризуется средними для

континентов величинами мощности земной коры (40–45 км). Вычисленная толщина литосферы на границе изучаемой области с Алдано-Становым щитом достигает 170 км и значительно уменьшается (до 100 км) при приближении к Монголо-Охотскому складчатому поясу. В геоэлектрических полях наиболее контрастным строением обладают территории, примыкающие к основным разломным структурам региона (Джелтулакский, Северо- и Южно-Тукурингрский разломы). Регион характеризуется общими положительными аномалиями гравитационного поля 20–30 мГал [6]. В Тукурингрской зоне разломов фиксируется протяженный пояс положительных аномалий 45–50 мГал, достигающих иногда значений 65 мГал. Для структур Селенга-Станового блока более характерны незначительные (до –20 мГал) отрицательные аномалии. В распределении выделяемого земной корой теплового потока региону присущи средние для орогенных поясов Дальнего Востока России значения, с юга на север отмечается незначительный рост от 42 до 50 мВт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, в первом приближении изучаемая область представляет собой коллаж террейнов различных как по вещественному составу слагающих их пород, так и по своим механическим свойствам, выражающимся в различной степени тектонической жесткости и энергонасыщенности. На основании чего можно предположить о существовании тектонически ослабленных зон, в которых амплитуда деформационных процессов должна значительно превышать фоновые значения.

#### **Материалы и методы исследования**

Основой исследования выступают многолетние GPS измерения, полученные авторами на Верхне-Амурском геодинамическом полигоне [7–9]. Полигон был заложен в 2007 г. и первоначально состоял из 8 пунктов наблюдений, с этого времени количество пунктов и их пространственное распределение постоянно увеличивается. В настоящее время общее количество действующих пунктов наблюдений достигло 23, таким образом, полигон простирается с запада на восток от точки EROF с координатами 121.96 в.д. 53.99 с.ш. до точки PIKA 127.43 в.д. 53.77 с.ш., и с юга на север от точки MAGD 125.80 в.д. 53.46 с.ш. до точки STAN 124.86 в.д. 56.04 с.ш.

В пределах обозначенной территории происходит взаимодействие тектонических единиц Селенга-Станового и Монголо-

Охотского орогенных поясов, Становой гранит-зеленокаменной области Алдано-Станового щита и Аргуно-Мамынского массива Центрально-Азиатского складчатого пояса. Основными трудностями при организации полигона являлись: недостаточно развитая транспортная сеть, затрудняющая доставку оборудования к точкам наблюдения, весьма незначительное количество выходов коренных пород, а также выветренность последних. Исходя из этих ограничений и высокой степени залесенности, реперные пункты неравномерно распределены по площади полигона.

Наблюдения на реперных пунктах проводились один раз в год в течение июля – августа, с целью исключения систематических ошибок, связанных с периодическими сезонными отклонениями в точности. Участки наблюдений – скальные выступы или бетонные основания, выбирались таким образом, чтобы исключить влияние склоновых, криогенных и эрозионных процессов, на достаточном удалении от объектов инфраструктурной деятельности.

В ходе проведения полевых работ GPS измерения фиксировались спутниковыми приемниками с 30-секундным интервалом при продолжительности сессии наблюдений не менее 36 ч. Полученные данные наблюдений обрабатывались программным комплексом GAMIT/GLOBK [10], разработанным в массачусетском технологическом институте.

Процедура обработки данных состоит из нескольких этапов. На первом этапе осуществляется подневная обработка данных полевых наблюдений с привлечением глобальных данных включающих в себя: точные эфемериды спутников, параметры ориентации Земли EOP (Earth Orientation Parameters) предоставляемые международной службой вращения Земли IERS (International Earth Rotating Service), таблицы нутации стандарта (IERS/IGS), лунные и солнечные эфемериды, таблицы отклонения системного времени GPS от всемирного координированного времени UTC (Coordinated Universal Time), смещения для кодовых измерений P1-C1 и P1-P2, таблицы гравитационных приливных эффектов, деформирующих земную кору с амплитудой, достигающей у полюсов 10 см. Моделирование тропосферной задержки сигнала осуществлялась на двух часовых интервалах. Минимальный угол восхождения спутника (угол отсечки) над горизонтом принимался за 10 градусов. Также на этом этапе об-

работки использовались RINEX (Receiver Independent Exchange Format) файлы станций международной сети IGS (International GPS Service), полученные с ftp сервера cddis.gsfc.nasa.gov. Эти данные необходимы для последующего объединения региональных данных с данными глобальных станций мировой IGS сети, входящих в систему отсчета ITRF2008.

На следующем этапе подневные данные (вычисленные координаты пунктов) группировались с помощью программы GLOBK в объединенные для каждой полевой кампании h-файлы, каждый из которых содержит ковариационную матрицу и откорректированные значения априорных параметров.

На заключительном этапе объединялись обработанные данные полевых измерений за несколько лет для получения окончательного решения в виде скоростей смещений пунктов. Для вычисления скоростей была использована система отсчета на основе данных о положении и скоростях 25 IGS станций, принадлежащих различным участкам взаимодействующих плит.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В результате обработки GPS данных для каждого пункта были получены временные ряды, описывающие изменения координат пунктов во времени, на основании которых было вычислено векторное поле скоростей, отображающее движения участков земной коры изучаемого региона (рис. 1).

На следующем этапе, с помощью программного комплекса Golden Software SURFER, была произведена интерполяция полученного поля скоростей на области, в которых наблюдения не проводились (рис. 2). Для наглядности приводимое на рис. 2 векторное поле пересчитано из глобальных координат в локальные, при этом в качестве неподвижного был выбран пункт DJEL и, соответственно, все вектора были пересчитаны относительно него. Интерполированное поле скоростей отображает вихревой характер происходящих геодинамических процессов, что является следствием глобальных нелинейных свойств геосреды как таковой [12]. Максимальных градиентов поле скоростей достигает на участках, приуроченных к Тукуринград-Желтулакской зоне разломов, в то время как для Становой и Аргуно-Мамыньских областей изменения векторного поля по площади незначительны.

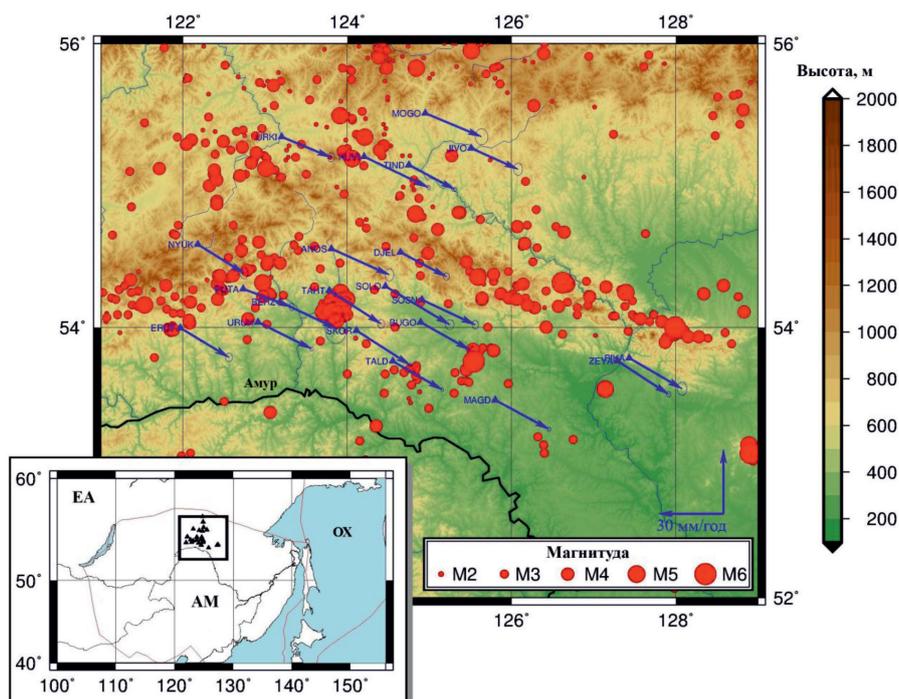


Рис. 1. Схема горизонтальных смещений и эпицентров землетрясений. Синие стрелочки – скорости горизонтальных смещений в системе ITRF2008 за период наблюдений 2007–2017 гг., красные круги – эпицентры землетрясений за период 1993–2017 гг. [11]. Врезка – схема границ литосферных плит. Черный квадрат – исследуемый регион. Красные линии – границы литосферных плит: EA – Евразийская, AM – Амурская, OX – Охотская

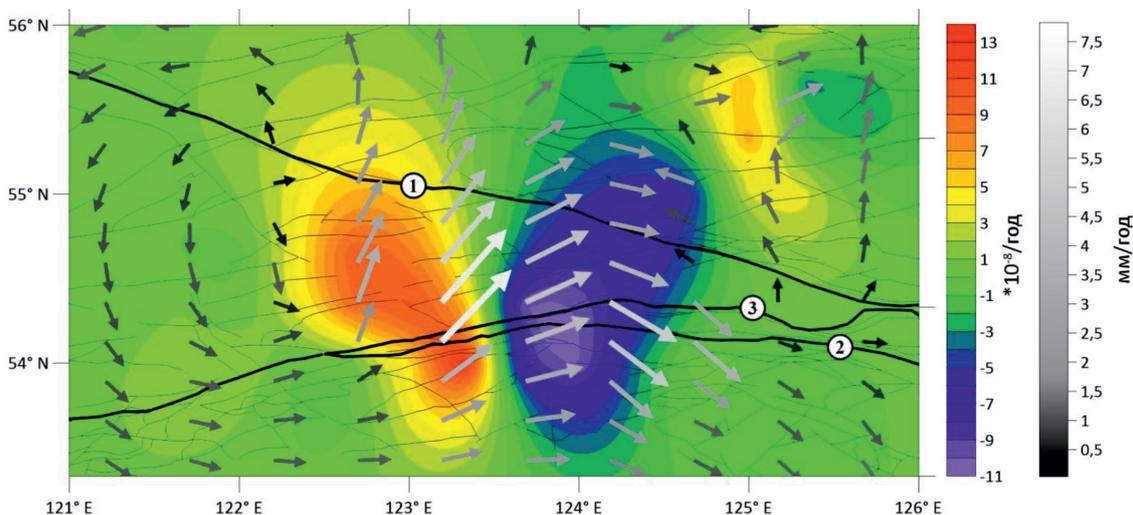


Рис. 2. Схема разломной тектоники [6] с интерполированным полем скоростей и вычисленными значениями дивергенции. Основные разломы: 1 – Джелтулакский, 2 – Северо-Тукурингрский, 3 – Южно-Тукурингрский. Тонкие черные линии – второстепенные разломы

Векторное описание смещений точек земной коры не является инвариантным, т.е. при смене начала отсчета изменяются величины и направления векторов. Для перехода от векторного поля к скалярному

воспользуемся первым инвариантом тензора деформации – дивергенцией. Для этого из интерполированного поля скоростей построим регулярную сеть, в которой для каждого узла сети с ячейкой  $0,33$  на  $0,33$  граду-

са найдем значения северной и восточной компонент интерполированного вектора. Вычислим дивергенцию для каждого узла сети по формуле

$$\operatorname{div} V = \frac{\partial V_e}{\partial e} + \frac{\partial V_n}{\partial n}.$$

Физический смысл этой величины заключается в обнаруживании «источников» ( $\operatorname{div} > 0$ ) и «стоков» ( $\operatorname{div} < 0$ ) векторного поля. Применительно к задачам геодинамики дивергенция позволяет обнаруживать участки, на которых площадь земной поверхности увеличивается или уменьшается, что соответствует областям растяжения или сжатия соответственно.

Вычисленное поле дивергенции отображает наличие двух локально сопряженных областей земной коры, близких по площади, геометрии и амплитуде деформационных процессов, но имеющих разные знаки. Схожие результаты, для Тукурингской зоны разломов, были получены на основе расчета поля дилатации с использованием других методологических подходов и исходных данных в работе Ашуркова с соавторами [13]. Столь сложная картина, вероятнее всего, обусловлена переходом от

кой области перехода было установлено ранее в работе Кример с соавторами [14].

Из материаловедения известно, что породы, слагающие земную кору, имеют различную прочность на растяжение и сжатие, прочность пород на сжатие во много раз превышает прочность на разрыв. Таким образом, в области растяжения земной коры происходит большое количество землетрясений малых энергетических классов, а в области сжатия землетрясения более редкие, но их энергетика более высока. Этот факт отчетливо наблюдается на рис. 3, где помимо дивергенции представлены данные сейсмического мониторинга [11]. В области растяжения наблюдается рассеянное по площади распространение сейсмособытий средних магнитуд, в то время как в области сжатия отмечается компактная область концентрации сейсмособытий, в которой магнитуды землетрясений достигают максимумов для изучаемого региона. Стоит отметить, что предложенный в работе подход вычисления интенсивности деформаций не учитывает сдвиговые процессы, вносящие довольно значительный вклад в пространственное распределение и энергетический класс землетрясений.

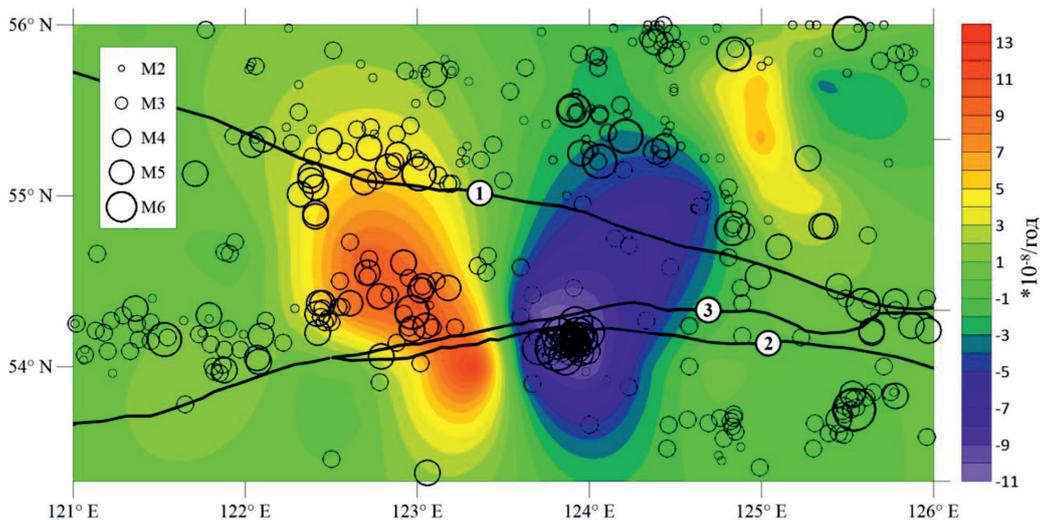


Рис. 3. Схема эпицентров землетрясений [11] и вычисленных значений дивергенции. Основные разломы: 1 – Джелтулакский, 2 – Северо-Тукурингский, 3 – Южно-Тукурингский

Байкальского типа напряжений к Становому типу. Для первого – характерны процессы растяжения земной коры, для второго – сжатия. На основании глобального моделирования тензорного поля градиента скорости деформации, существование та-

### Заключение

Представленная в работе модель геодинимических процессов Верхнего Приамурья отображает их вихревой характер. Наиболее интенсивные деформации, в пределах изучаемого региона, получены на участках,

примыкающих к Турурингской зоне разломов, в которых скорости деформаций на 2 порядка превышают типичные для внутриплитных областей значения. Выявлена область смены знака доминирующих тектонических напряжений, маркирующая изменение преобладающих типов геодинамических процессов от байкальского к становому. Показана связь деформационных процессов с сейсмичностью изучаемого региона.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00049 и комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (№ 18-5-024).*

### Список литературы / References

- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М: КДУ, 2005. 560 с.
- Khain V.E., Lomize M.G. Geotectonics with the basics of geodynamics. M: KDU, 2005. 560 p. (in Russian).
- Altamimi Z., Rebischung P., Metivier L., Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2016. № 121. P. 6109–6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.
- Тимофеев В.Ю., Казанский А.Ю., Ардюков Д.Г., Метелкин Д.В., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Гильманова Г.З. О параметрах вращения сибирского домена и его восточного обрамления в различные геологические эпохи // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 4. С. 21–31.
- Timofeev V.Y., Kazansky A.Y., Ardyukov D.G., Metelkin D.V., Timofeev A.V., Gornov P.Y., Gil'manova G.Z., Shestakov N.V. Rotation parameters of the Siberian domain and its eastern surrounding structures during different geological epochs // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2011. Vol. 5. No 4. P. 288–297. DOI: 10.1134/S1819714011040075.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртоого О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7–41.
- Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I., Badarch G., Belichenko V.G., Bulgatov A.N., Dril S.I., Kirillova G.L., Kuzmin M.I., Nokleberg U., Prokopiev A.V., Timofeev V.F., Tomurtogoo O., Yan H. A model for the formation of orogenic belts in Central and Northeast Asia // *Pacific Geology*. 2003. Vol. 22. No 6. P. 7–41 (in Russian).
- Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / отв. ред. Диденко А.Н., Малышев Ю.Ф., Саксин Б.Г. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с.
- Deep structure and metallogeny of East Asia / отв. Ed. Didenko A.N., Malyshev Yu.F., Saksin B.G. Vladivostok: Dal'nauka, 2010. 332 p. (in Russian).
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000. Издание третье. Дальневосточная серия. Лист: N-51 (Сковородино). СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 2009.
- State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1: 1,000,000. The third edition. Far Eastern series. Sheet: N-51 (Skovorodino). St. Petersburg: Cartagena VSEGEI, 2009 (in Russian).
- Жижерин В.С., Серов М.А. Кинематика современных тектонических движений в восточной части Монголо-Охотского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 12. С. 2143–2152. DOI: 10.15372/GiG20161203.
- Zhizherin V.S., Serov M.A. Kinematics of recent tectonic motions in the east of the Mongol-Okhotsk fold belt // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No 12. P. 1688–1695 DOI: 10.1016/j.rgg.2016.04.008.
- Жижерин В.С., Серов М.А. Современная тектоника западной части Джугджуро-Станового террейна юго-восточного обрамления Северо-Азиатского кратона // Геотектоника. 2017. № 6. С. 66–71. DOI: 10.7868/S0016853X17060108.
- Zhizherin V.S., Serov M.A. Present-day tectonics of the western part of the Dzhugdzhur–Stanovoi terrane of the southeastern frame of the North Asian craton // *Geotectonics*. 2017. Vol. 51. No 6. P. 591–595. DOI: 10.1134/S0016853217060103.
- Жижерин В.С., Серов М.А., Сорокин А.П. Современная кинематика северной окраины Аргунского континентального массива (восточная часть Центрально-Азиатского складчатого пояса) // Доклады академии наук. 2018. Т. 479. № 1. С. 41–43. DOI: 10.7868/S0869565218010103.
- Zhizherin V.S., Serov M.A., Sorokin A.P. Modern kinematics of the northern margin of the Argun continental massif (eastern part of the Central Asian fold belt) // *Doklady akademii nauk*. 2018. Vol. 479. No. 1. P. 41–43 (in Russian).
- Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.7. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. 2018. 54 p.
- ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gsras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl> (дата обращения: 27.09.2018).
- ФГБУН Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences» (FICS EGS RAS) [Electronic resource]. URL: <http://www.gsras.ru/cgi-bin/new/catalog.pl> (date of access: 27.09.2018) (in Russian).
- Ротационные процессы в геологии и физике / Отв. Ред. Е.Е. Милановский. М: КомКнига, 2007. 528 с.
- Rotational processes in geology and physics / Отв. Ed. HER. Milanovsky. M: ComKniga, 2007. 528 p. (in Russian).
- Ашурков С.В., Серов М.А., Жижерин В.С., Имаев В.С. Современные деформации Верхнего Приамурья по данным GPS измерений // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 5. С. 86–96. DOI: 10.30911/0207-4028-2018-37-5-86-96.
- Ashurkov S.V., Serov M.A., Zhizherin V.S., Imaev V.S. Present-Day Deformations in the Upper Amur Region from GPS Measurements // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2018. Vol. 12. No. 5. P. 419–428. DOI: 10.1134/S1819714018050020.
- Kreemer C., Blewitt G., Klein E.C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochem. Geophys. Geosyst*. 2014. No. 15. P. 3849–3889. DOI: 10.1002/2014GC005407.