PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2018 VOLUME 9 ISSUE 3 PAGES 771-800

https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0371

ISSN 2078-502X

RESULTS OF THE TECTONIC STRESS STUDY OF THE NORTHERN EURASIA REGIONS

L. A. Sim¹, A. V. Marinin¹, G. V. Bryantseva², N. A. Gordeev¹

¹ O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia ² M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

Abstract: The article presents the results obtained by field tectonophysical methods applied to study tectonic stresses of the Northern Eurasia regions, including young and ancient platforms (West European, Timan-Pechora, Turan, West Siberian, East European, and East Siberian) and orogenic frame structures (Caucasus, Northern Tien Shan, Mongolia-Okhotsk system of mesozoids, and Sakhalin Island). Tectonic stress reconstructions provided the basis for analysing the influence of spreading in the North Atlantics and the Arctic on the stress state of the platforms in Northern Europe. A spatial boundary of the influence goes approximately along the margins of the Fennoscandian shield and the Russian plate in the north. Further southwards, the boundary is submeridional and extends from the western wing of the Byelorussian anteclise almost to the Eastern Carpathians. The stress reconstructions for this boundary show the WNW and W-E-trending axes of compression. The boundary line does not coincide with the Teisser-Tornquist line that represents the boundary between the platforms with heterochronous basements. However, it correlates well with heat flow anomalies. The boundary area is confined to the Baltic coast [Sim, 2000]. Along the boundary area, near the Baltic Sea, there is an area wherein faulting is mainly caused by extension [Sim, 2000]. In this setting, helium permeability is the highest, as shown by the crust map of the European part of the USSR [Eremeev, 1983]. Extension in this area is probably related to formation of young grabens in the Baltic shield. Changes in the compression axis orientation may be due to the alternating activations of the grabens in the submeridional Botnic Gulf and the latitudinal Gulf of Finland. Reconstructions for individual faults show contradictions in the directions of shear displacements: both right- and left-lateral displacements are possible on the same fault segments, and the axes of compression can have either latitudinal or meridional orientations. The focal mechanisms of the Osmussaar and Kaliningrad earthquakes (meridional and latitudinal axes of compression, respectively) give evidence of specific current neotectonic stresses in this area. Another zone is distinguished at 52°N from the above-described area. It is mainly sublatitudinal and detected along the southern flank of the Byelorussian anteclise. Further to the east, its orientation changes to SSW, and it roughly follows the SW boundary of the Voronezh anteclise. Reconstructions for the Ukrainian Shield, located south of this zone, show mainly the unstable orientations of the axes of compression. For the platforms in Northern Eurasia, the tectonophysical methods reconstructed neotectonic stresses in the structures formed under the influence of intraplatform tectonic stresses. These are the residual gravitational horizontal compression stresses released by long-term denudation and uplifting of the structures, including the Khibiny massif of the Baltic Shield, the Olenek and Munsky massifs of the East Siberian platform. These structures are composed of the ancient Archaean-Proterozoic rock complexes, which have been subjected to predominantly vertical displacements for a long time, from the Paleozoic to the modern stage. Special attention should be given to the tectonic stresses of Sakhalin located at the

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: V.A. Sankov

Received: March 1, 2018 **Revised:** June 14, 2018 **Accepted:** July 2, 2018

For citation: *Sim L.A., Marinin A.V., Bryantseva G.V., Gordeev N.A.*, 2018. Results of the tectonic stress study of the Northern Eurasia regions. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 771–800. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0371.

Для цитирования: *Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., Гордеев Н.А.* Результаты изучения тектонических напряжений в регионах Северной Евразии // *Геодинамика и тектонофизика.* 2018. Т. 9. № 3. С. 771–800. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0371.

L.A. Sim et al.: Results of the tectonic stress study...

boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates. At the edges of these two largest plates, there are the Amur and Okhotsk microplates separated by the Central Sakhalin fault, as described in some publications. Neotectonic stress reconstructions for Sakhalin Island show sublatitudinal compression and submeridional extension in the common stress field of shearing. The tectonophysical studies show that the neotectonic stresses differ in large structures: horizontal compression and shearing are typical of the uplifts (Kola Peninsula, Tien Shan, Sakhalin), while horizontal extension and extension with shearing are characteristic of depressions (Kandalaksha graben, depressions of the Tatar Gulf and the Sea of Okhotsk). Our studies provide the data on spacious 'white spots' in the modern stress maps of Northern Eurasia. The stress reconstructions for practically all the studied structures show that shearing is the dominant geodynamic regime in the study region.

Key words: tectonic stress; Northern Eurasia; fault; geodynamics; neotectonics

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Л. А. Сим¹, А. В. Маринин¹, Г. В. Брянцева², Н. А. Гордеев¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва. Россия

Аннотация: В статье обсуждаются результаты изучения тектонических напряжений севера Евразии полевыми тектонофизическими методами в пределах молодых и древних платформ: Западно-Европейской, Тимано-Печорской, Туранской, Западно-Сибирской, Восточно-Европейской и Восточно-Сибирской, а также в орогенных структурах обрамления: на Кавказе, на Северном Тянь-Шане, в Монголо-Охотских структурах мезозоид, на Сахалине. В результате определена граница влияния процессов спрединга в Северной Атлантике и Арктике на напряженное состояние платформ Северной Европы. Она проходит примерно по границе Фенноскандинавского щита и Русской плиты на севере, далее на юг она проходит субмеридионально по западному крылу Белорусской антеклизы практически до Восточных Карпат. Ожидаемая граница с разной ориентацией осей сжатия запад-северо-западного и меридионального простирания не совпала с линией Тейссера-Торнквиста – границей платформ с разновозрастным фундаментом, при этом она хорошо коррелируется с аномалиями теплового потока. Выделенная область приурочена к побережью Балтики [Sim, 2000]. Вдоль нее вблизи Балтийского моря выделяется специфическая область, внутри которой большинство разломов формируется в обстановке растяжения [Sim, 2000]. Такая обстановка сопровождается максимальной проницаемостью гелия, откартированной в 1983 г. в земной коре европейской части СССР [Eremeev, 1983]. Обстановка растяжения в этой области, вероятно, связана с процессами формирования молодых грабенов Балтийского щита, а смена ориентации оси сжатия предположительно может быть обусловлена попеременной активизацией грабенов субмеридионального Ботнического и широтного Финского залива. По отдельным разломам в этой области восстанавливаются противоречивые направления сдвиговых смещений, т.е. по ним возможны как правосторонние, так и левосторонние перемещения на одних и тех же отрезках разломов, а ориентация оси сжатия может быть как широтной, так и меридиональной. Механизмы очагов Осмуссаарского, Калининградского землетрясений с меридиональными и широтными осями сжатия свидетельствуют о том, что специфика неотектонических напряжений в описываемой области характерна и для современного этапа. От этой области на 52° с.ш. отходит вторая зона – в целом субширотная; она проходит по южному крылу Белорусской антеклизы, далее на восток она приобретает ССЗ ориентировку, примерно повторяя ЮЗ границу Воронежской антеклизы. Южнее этой зоны неустойчивые ориентировки осей сжатия определены преимущественно на Украинском щите. В пределах платформ Северной Евразии тектонофизическими методами восстановлены неотектонические напряжения в структурах, формирующихся под воздействием внутриплатформенных тектонических напряжений – остаточных гравитационных горизонтальных сжимающих напряжений, реализованных при вертикальном подъеме структур и длительной денудации. К таким структурам отнесены Хибинский массив на Балтийском щите, Оленекский и Мунский массивы Восточно-Сибирской платформы. Перечисленные структуры характеризуются тем, что они сложены древними архей-протерозойскими комплексами пород, которые длительное время – от палеозоя и до новейшего этапа – испытывают преобладающие вертикальные перемещения. Особое место занимают результаты изучения тектонических напряжений на Сахалине, расположенном в пограничной полосе между Евразийской и Североамериканской литосферными плитами. На границе между этими крупнейшими плитами выделяются Амурская и Охотоморская микроплиты, граница между которыми проводится рядом авторов по Центрально-Сахалинскому разлому. Установлено, что для Сахалина характерно единое общее сдвиговое поле неотектонических напряжений с субширотным сжатием и субмеридиональным растяжением. Тектонофизические исследования показали

различия неотектонических напряжений в крупных структурах: для поднятий характерен режим горизонтального сжатия и сдвиговый режим (Кольский п-ов, Тянь-Шань, Сахалин), а для впадин – режим горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом (Кандалакшский грабен, впадины Татарского залива и Охотского моря). Проведенные исследования закрыли огромные по площади «белые пятна» на картах современных напряжений севера Евразии и показали доминирование регионального сдвигового геодинамического режима практически во всех изученных структурах.

Ключевые слова: тектоническое напряжение; Северная Евразия; разлом; геодинамика; неотектоника

1. Введение

Изучение внутриплитных напряжений относится к важнейшим и приоритетным направлениям современной геологии [Kropotkin, 1977; Leonov, 1995; Khain, Lomize, 1995]. При этом необходимо отметить, что на картах напряженного состояния верхней части земной коры платформенные структуры Северной Евразии представляют собой «белое пятно», как, например, на карте напряженного состояния верхней части литосферы Азии, составленной С.И. Шерманом и О.В. Луниной [Levi, Sherman, 2005].

Такое состояние изученности внутриплитных напряжений определило цель исследования: установление закономерностей распределения осей сжатия и растяжения как в локальных, так и в региональных объемах горных пород в разных геоструктурах Северной Евразии полевыми и камеральными тектонофизическими методами для решения следующих задач: а) характеристики напряженного состояния в структурах с разной историей развития, находящихся на современном этапе в различной геодинамической позиции, и оценки регионального поля напряжений для отдельных крупных структур, в том числе и в приграничных областях взаимодействия крупных литосферных плит; б) определения возможных источников тектонических напряжений внутри крупных структур; в) определения влияния глобальных тектонических процессов на неотектоническое напряженное состояние севера Евразии.

Решение поставленных задач производилось с применением комплекса структурных методов изучения разломной тектоники, так как разрывные нарушения всех рангов являются наиболее однозначными индикаторами тектонических напряжений, а также с использованием полевых методов реконструкции тектонических напряжений, широко применяемых в тектонофизических исследованиях.

Тектонические напряжения Северной Евразии восстановлены полевыми и камеральными мето-

дами в следующих геоструктурных зонах: а) на крупнейших молодых платформах и плитах с разновозрастным, преимущественно палеозойским, фундаментом - Западно-Европейской, Тимано-Печорской, Туранской, Западно-Сибирской; б) на крупнейших древних платформах с архей-протерозойским фундаментом - Восточно-Европейской и Восточно-Сибирской; в) в орогенных структурах обрамления платформ: в Карпатах, в Крыму, на Кавказе, на Северном Тянь-Шане, а также в монголо-охотских мезозоидах Восточного Забайкалья. Особое место занимают тектонофизические исследования на Сахалине - в структуре в пограничной полосе между крупнейшими литосферными плитами – Евразийской и Североамериканской, на границе которых выделяются микроплиты – Амурская и Охотская. Результаты изучения тектонических напряжений в перечисленных структурах позволили охарактеризовать напряженно-деформированное состояние крупнейших структур севера Евразии, представлявших «белое пятно» на картах тектонических напряжений мира, выделить на платформах структуры с внутриплатформенными источниками тектонических напряжений, установить границу влияния процессов спрединга в Северной Атлантике и Арктике на напряженно-деформированное состояние платформ Северной Евразии и подтвердить влияние процессов орогенеза в Альпийско-Гималайской зоне коллизии на распределение тектонических напряжений на соседних платформах.

2. НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ И ИЗУЧЕННОСТЬ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СЕВЕРА ЕВРАЗИИ

Неотектонические структуры севера Евразии. Север Евразийской плиты по площади преимущественно состоит из платформ на разновозрастном фундаменте. На древнем сложнопостроенном архейпротерозойском фундаменте здесь выделяются две глобальные платформенные структуры: Восточно-Европейская и Восточно-Сибирская (Сибирская) платформы, а также молодые платформенные плиты с эпибайкальским и эпипалеозойским фундаментом: Западно-Европейская, Тимано-Печорская, Скифская и Западно-Сибирская, в основании которых лежат преимущественно палеозойские складчатые структуры обрамления. Необходимо отметить, что Сибирская (Восточно-Сибирская) древняя платформа в свете тектоники плит в 2000–2001 гг. выделена в собственно Сибирскую (в рамках древней платформы) коровую плиту, а восточнее границы, проходящей по продолжению хребта Гаккеля на континенте, выделена Восточно-Сибирская [Kolodeznikov, 2017, с. 4, рис. 1].

Перечисленные платформы обрамляются орогенными структурами Карпат, Кавказа и Тянь-Шаня, входящих в протяженную сеть Альпийско-Гималайского пояса. Неотектонические структуры Восточно-Сибирской платформы окружены мезозоидами с юга и востока, а также орогенными структурами Монголо-Охотской и Верхоянской складчатых областей. Особое место занимают орогенные структуры Сахалина, находящиеся на границе сближения Амурской и Охотской микроплит [Grachev, 1996].

Возможные источники неотектонических напряжений севера Евразии. Вероятная природа внутриплитных напряжений глобального уровня связана с движением крупнейших плит литосферы, перемещение которых определяет формирование двух основных геодинамических режимов: 1) горизонтального сжатия, вызываемого конвергенцией (сближением) плит; 2) горизонтального растяжения при спрединге (раздвижении) плит. Подобные движения литосферных плит формируют в области их активного взаимодействия соответствующий тип напряженного состояния, который передается на достаточно большие расстояния. Например, этим объясняются напряжения горизонтального сжатия, действующие в коре Центральной Азии на расстояниях в несколько тысяч километров от зоны коллизии Индийской и Евроазиатской плит [Molnar, Tapponnier, 1975]. Согласно работе [Zoback, 1992], оси сжатия при этом ориентированы в обобщенном виде ортогонально границам литосферных плит и закономерности их ориентировок могут помочь в поисках природы внутриплитных напряжений. Обобщение о природе внутриплитных напряжений проведено в работах [Leonov, 1995; Lobkovsky et al., 2004]. Сделан вывод, что «они контролируются глобальными силами тектоники плит», что они неравномерны во времени; при этом фазы их пиковых всплесков могут длиться около миллиона лет [Lobkovsky et al., 2004]. В работе [Goncharov et al., 2012] предлагается гипотеза о глобальном процессе субмеридионального сжатия в Северном полушарии вследствие одноячеистой конвекции, которая, возбуждаемая северным дрейфом ядра, осуществляет в течение всего фанерозоя поверхностный горизонтальный, направленный к северу, поток вещества мантии, перемещающий континенты из Южного полушария в Северное.

Генезис избыточных напряжений горизонтального сжатия, являющихся одной из серьезнейших проблем в горном деле, часто также связывают с проявлением дальнодействующего давления от границ литосферных плит, реже – с планетарными напряжениями, вызванными вращением Земли. Альтернативный генезис таких напряжений связывают с остаточными напряжениями предыдущих эпох [Ponomarev, 1971; Volokh et al., 1972; Markov, 1980]. Ю.Л. Ребецкий [Rebetsky, 2008] предлагает для объяснения длительного существования в породах верхних слоев коры остаточных напряжений гравитационного напряженного состояния (ГНС) присутствие внутренних литосферных процессов, происходящих в коре орогенов, щитов и плит. К таким процессам относятся вертикальные восходящие движения, вызванные соответствующими движениями на подошве коры или литосферы [Rebetsky, 2008]. Сопутствующие им экзогенные процессы приводят к упругой разгрузке остаточных горизонтальных гравитационных напряжений, вызванной эксгумацией пород при воздымании поверхности. Оценка эрозии Фенноскандинавского щита за мезозой – кайнозой [Sim, 2012] позволила произвести расчет величины избыточных напряжений горизонтального сжатия в массиве горных пород при действии только массовых (гравитационных) сил в породах Кольского п-ова, соизмеримой с величинами современных напряжений в Хибинском и Ловозерском массивах [Rebetsky et al., 2017a].

Изученность неотектонических напряжений севера Евразии. Начало изучения тектонофизических исследований полевыми методами в Северной Евразии положено одним из первых исследователей тектонофизики – М.В. Гзовским, предложившим метод выделения сколовых сопряженных трещин [Gzovsky, 1954, 1975]. Крупной работой после М.В. Гзовского по методу выделения сопряженных сколовых трещин является карта тектонических напряжений запада Верхояно-Чукотской складчатой области [Gusev, 1979]. Позже было охарактеризовано напряженно-деформированное состояние Байкальской рифтовой зоны [Sherman, Dneprovsky, 1989]. Практически в те же годы П.Н. Николаев, предложивший конструктивные коррекции в методику выделения сколовых сопряженных трещин и разработавший статистический метод реконструкции тектонических напряжений [Nikolaev,

1977], составил схемы разноранговых тектонических напряжений Кавказа и Восточно-Европейской платформы [Nikolaev, 1992]. Статистическим методом позже были составлены карты тектонических напряжений ряда объектов в Узбекистане [Umurzakov, 2009] и дополнены карты напряженного состояния Байкальской рифтовой зоны [Lunina, Gladkov, 2007], а также проведено дальнейшее изучение тектонических напряжений в этом регионе [Delvaux et al., 1995, 1997; Cheremnykh, 2006; Lunina, Gladkov, 2007; Lunina et al., 2007]. Результаты изучения тектонических напряжений севера Сибирской платформы (Якутская алмазоносная провинция) изложены в работах [Gladkov et al., 2008; Seminsky *K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016*]. Тектонические напряжения Монголо-Сибирской подвижной области исследованы в работе [San'kov et al., 2011].

Тектонические напряжения Донбасса глубоко изучены В.А. Корчемагиным [Korchemagin, 1984] и его последователями. Исследования неотектониченапряжений структурно-парагенетическим ских методом, разработанным Л.М. Расцветаевым [Rastsvetaev, 1982], автором метода в соавторстве с коллегами – Т.Ю. Тверитиновой, Н.Н. Курдиным, А.В. Марининым и др. проведены в целом ряде структур Кавказа, Крыма [Marinin, Tveritinova, 2016; *и др.*]. На территории Украинского щита тектонические напряжения восстановлены полевым методом, разработанным О.Б. Гинтовым и В.М. Исаем [Gintov, Isai, 1984a, 1984b]. Позже О.Б. Гинтов, А.В. Муровская, В.В. Гончар посвятили серию работ тектоническим напряжениям Крыма [Gintov et al., 2002; Murovskaya, 2012; Gonchar, 2017]. М.Л. Коппом с коллегами полевыми методами изучено напряженное состояние юго-востока Русской плиты [Kopp et al., 2014; Kopp, 2017]. Фрактографическим методом реконструкции палеонапряжений [Bankwitz, Bankwitz, 1984] авторами проводилось изучение ряда структур в Западной Европе, а по методике, разработанной Ж. Анжелье [Angelier et al., 1994; Saintot, Angelier, 2002; и др.], тектонические напряжения восстановлены во многих регионах мира, в том числе в пределах юга европейской части России. По этой же методике исследованы тектонические напряжения Северного Тянь-Шаня и Алтае-Саян [Delvaux et al., 2013]. Напряженно-деформированное состояние относительно небольших по площади структур Европы исследовалось преимущественно методом Ж. Анжелье [Angelier, 1975, 1979]. Так, реконструированы тектонические напряжения в структурах Предкарпатского прогиба на территории Польши [Lamarche et al., 2002], на отдельных разломах и складках во Франции [Homberg et al., 2002], а также в других регионах. С 1979 г. началось планомерное изучение тектонических напряжений на севере Восточно-Европейской платформы, Тимано-Печорской плиты, включая выходы байкалид в фундаменте указанной плиты на Среднем и Северном Тимане, а также в северных частях Урала [Sim, 2000; и dp.]. С 1991 г. предложенным структурно-геоморфологическим методом реконструкции сдвиговых тектонических напряжений [Sim, 1991; 2000] восстановлены неотектонические напряжения Западно-Сибирской, Восточно-Сибирской платформ и отдельных орогенных структур; результаты этих исследований являются предметом данной статьи (рис. 1).

3. МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКИМ ИНДИКАТОРАМ

В данной работе использован комплекс полевых методов реконструкции палеонапряжений, а также структурно-геоморфологический камеральный метод восстановления неотектонических напряжений.

3.1. Метод выделения сколовых сопряженных трещин

Основные принципы анализа полей напряжений, действующих в объемах земной коры, сформулированы М.В. Гзовским [Gzovsky, 1954, 1975], впервые начавшим систематическое изучение современных и древних тектонических напряжений и предложившим метод их реконструкции на основе выделения сколовых сопряженных трещин. Критерием определения ориентации осей главных нормальных напряжений являлось свойство горных пород раскалываться под углом (45°-α) к оси сжатия σ₃, где α – угол скалывания, зависящий от физических свойств породы. Ось сжатия определяется по биссектрисе острого угла между сопряженными трещинами, линия пересечения последних является промежуточной осью, а ось растяжения, соответственно, нормальна к обеим названным осям. Дополнительным критерием выделения сопряженных пар трещин является противоположность направлений смещений на них. Технология метода предусматривает массовый замер трещиноватости в горных породах с последующим анализом.

3.2. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений

Метод базируется на закономерно ориентированных векторах перемещения, измеренных на плоскостях со следами тектонических перемещений в виде борозд и штриховок скольжения [Gushchenko, 1973; Gushchenko, Sim, 1974; Gushchenko, 1979]. Если в восстановленном локальном стресс-



Рис. 1. Схема неотектонических напряжений Северной Евразии.

зойский; 11–13 – области развития крупных прогибов в складчатых поясах: 11 – каледонского, 12 – герцинского, 13 – киммерийского возраста; 14 – Хребет Гаккеля; 15 – разрывные структуры I ранга; 16-18 - неотектонические напряжения, восстановленные структурно-геоморфологическим методом: 16 - ориентировка оси сжатия в горизонфизическими методами и методами структурной геологии; 20 – участки детальных исследований тектонических напряжений структурно-геоморфологическим методом: 1-5 – Западно-Сибирская плита: 1 – Александровский свод, 2 – Ай-Пим, 3 – Южно-Покачевское месторождение, 4 – Демьяновское, Кальчинское месторождения, 5 – Северск; 1–13 – тектонические структуры Северной Евразии (по [*Milanovsky, 2007*], с упрощениями). 1–3 – платформы: 1 – плиты, 2 – щиты и выступы фундамента древних платформ, 3 - метаплатформенные области; 4-10 - складчатые пояса: 4 - байкальский, 5 - салаирский, 6 - каледонский, 7 - герцинский, 8 - киммерийский, 9 - альпийский, 10 - кайнотальной плоскости, 17–18 – геодинамические обстановки формирования разломов: 17 – сжатия, 18 – растяжения; 19 – районы детальных исследований полевыми тектоно-6 – Норильск; 7–9 – Сибирская платформа: 7 – Байкитская антеклиза, 8 – Иркинеево-Чадобецкий прогиб, 9 – месторождение Чона; 10 – Парамушир (по [*Khubaeva et al.*, 2007]); 11 – Стрельцовская кальдера.

Fig. 1. Schematic map of neotectonic stresses in Northern Eurasia.

1-13 - tectonic structures of Northern Eurasia (after [*Milanovsky*, 2007], modified]. 1-3 - platforms: 1 - plates, 2 - shields and edges of ancient platform basements, 3 - meta-platform areas; 4–10 – fold belts: 4 – Baikal, 5 – Salair, 6 – Caledonian, 7 – Hercynian, 8 – Cimmerian, 9 – Alpine, 10 – Cenozoic; 11–13 – areas of large depressions in fold belts: 11 – Caledonian, 12 - Hercynian; 13 - Cimmerian. 14 - Gakkel ridge; 15 - faults of rank 1; 16-18 - neotectonic stress reconstructed from structural and geomorphological data: 16 - orientation of the compression axis in the horizontal plane, 17–18 – geodynamic setting of faulting: 17 – compression, 18 – extension; 19 – areas studied in detail by the field tectonophysical methods and the methods of structural geology; 20 - areas studied in detail to detect tectonic stresses by the method of structural geomorphology; 1–5 - West Siberian plate: 1 - Aleksandrovsky dome, 2 - Ai-Pim, 3 - Yuzhno-Pokachov deposit, 4 - Demianovskoe and Kalchinskoe deposits, 5 - Seversk; 6 - Norilsk; 7-9 - Siberian platform: 7 - Baikit anteclise, 8 - Irkineevo-Chadobetsky deflection, 9 – Chona deposit; 10 – Paramushir (after [*Khubaeva et al., 2007*]); 11 – Streltsovskaya caldera. состоянии (ЛСС) ориентация векторов перемещения закономерна, то объем горных пород испытал один этап деформирования, в процессе которого по ослабленным плоскостям любого генезиса и любого возраста, размер которых не выходит за рамки деформируемого объема пород, восстанавливаются ориентации осей главных напряжений и оценивается на качественном уровне вид напряженного состояния, определяемый коэффициентом Лоде – Надаи μ_σ. Принципиально важным при реконструкции тектонических напряжений кинематическим методом по бороздам скольжения, зафиксированным в древних породах, является утверждение о доминировании зеркал скольжения со следами перемещений последнего тектонического перемещения, а именно - неотектонического. Это утверждение было проверено О.И. Гущенко на 600-м горизонте рудника Расвумчорр (Хибины, Кольский п-ов), где проводились инструментальные измерения in situ современных напряжений. Сопоставление ориентировок осей главных нормальных напряжений, восстановленных по бороздам скольжения в массиве девонвозраста, показало удовлетворительную ского корреляцию с данными инструментальных измерений, что свидетельствует о молодом возрасте следов тектонических перемещений [Markov, 1977; Gushchenko, 1979].

3.3 МЕТОД ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДИЗЪЮНКТИВНЫХ СТРУКТУР

Основу метода составляет установленная автором зависимость от параметров тензора напряжений различных структурных форм, связанных предполагаемой общностью условий формирования [*Rastsvetaev, 1982*]. По сути используемых в методе Л.М. Расцветаева исходных данных речь должна идти о реконструкции параметров тензора деформаций, обусловленных разрывной и трещинной тектоникой. Следует отметить, что количественные данные с помощью этого метода получаются только в отношении определения ориентации главных осей тензора трещинных деформаций. Вид эллипсоида деформаций определяется качественным образом.

3.4. Метод катакластического анализа

Для обработки замеров трещин и зеркал скольжения с установленным характером смещений использовался метод катакластического анализа [*Rebetsky, 2007*] и созданная на его основе компьютерная программа *STRESSgeol* [*Rebetsky, 2007; Rebetsky et al., 2017b*]. Метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний, таких как положение осей главных напряжений, тип напряженного состояния, коэффициент Лоде – Надаи и др. Основные положения метода базируются на представлениях о квазипластическом деформировании геологической среды, установлении режима деформирования, положениях современной теории пластичности и максимуме диссипации внутренней упругой энергии для искомого тензора напряжений. Все положения и алгоритмы метода более подробно изложены в работах [*Rebetsky, 2007; Rebetsky et al., 2017*].

3.5. Метод нахождения общих полей напряжений

При обработке множества локальных стресссостояний, характеризующих локальные или региональные деформации, вызванные достаточно простым способом нагружения массива, удобно использовать усредненные параметры тензора напряжений, обозначаемые термином «общее поле напряжений». Обоснованием метода расчета параметров такого тензора, предложенного Л.А. Сим [Sim, 1982], служат данные математического и физического моделирования тектонических напряжений вокруг одиночного разрыва [Osokina, 1987]. По результатам моделирования установлено, что за счет подвижки по разлому происходят локальные возмущения ориентировки осей приложенных извне напряжений; отклонение осей возмущенного поля напряжений не превышает угол 45° независимо от ориентировки осей сжатия внешней нагрузки по отношению к разрыву. Таким образом, все варианты локальных осей сжатия и растяжения, нанесенные на единую стереограмму, можно описать двумя коническими поверхностями с углом при вершине 90°; оси этих конических поверхностей взаимно перпендикулярны. В одном из этих конусов не будет ни одной оси растяжения, его ось будет совпадать с осью внешнего сжатия, а в другом конусе не будет ни одной оси сжатия; ось второго конуса является осью растяжения внешнего поля (рис. 2). Нахождение осей общего поля напряжений производится с помощью конической палетки О.И. Гущенко [Gushchenko, 1979].

3.6. Структурно-геоморфологический метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений

Этот метод [Sim, 1991; Sim, Sergeev, 1996] базируется на анализе закономерно ориентированных оперяющих разрывов в зоне динамического влияния сдвигов, откартированных при полевом изучении и при моделировании сдвигов, обобщенных М.В. Гзовским [Gzovsky, 1975]. Фактическим материалом для этого метода служат данные дешифрирования линеаментов - предполагаемых сдвигов и мелких прямолинейных элементов рельефа (мегатрещин) вблизи него. Если их взаимные ориентировки как между собой, так и по отношению к линеаменту соответствуют ориентировкам оперяющих разрывов в зоне сдвигов, то определяются горизонтальные ориентировки осей сжатия и растяжения, направление сдвигового перемещения по разлому и геодинамическая обстановка формирования разлома (дополнительного сжатия или растяжения). Возраст восстановленных структурногеоморфологическим (СГ) методом стресс-состояний принимается за новейший и современный изза выраженности мегатрещин в новейших и четвертичных отложениях. На рис. 3 показаны результаты реконструкции неотектонических напряжений на территории Польши (слева) и сравнение меридионально ориентированных осей растяжения с депрессиями и эскарпами, выраженными в рельефе. Очевидно, что эти новейшие структуры соответствуют ориентации осей растяжения и одинаково выражены на участках платформ с разновозрастным фундаментом с запада и востока от линии TT (рис. 3).

4. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАТФОРМ СЕВЕРА ЕВРАЗИИ

На севере Евразии с запада на восток изучены тектонические напряжения на Западно-Европейской плите (ЗЕП), Восточно-Европейской платформе (ВЕП) с выступающим древним фундаментом, на Фенноскандинавском и Украинском щитах, Тимано-Печорской платформе с эпибайкальским фундаментом, выступающим на дневной поверхности в пределах Тиманского кряжа, которая граничит с Восточно-Европейской платформой по Западно-Тиманскому глубинному разлому, Западно-Сибирской и Туранской молодых плитах с палеозойским гетерогенным складчатым фундаментом и Восточно-Сибирской древней платформе с архейским фундаментом.

4.1. Западно-Европейская плита

В пределах Западно-Европейской платформы сдвиговые неотектонические напряжения восстановлены СГ методом [*Sim, 2000*] в пределах Северо-Германской депрессии и восточной части структуры на территории Польши (рис. 3). Новейшие сдвиги Западно-Европейской плиты активизированы в региональном сдвиговом поле напряжений с субмеридиональной и запад-северо-западной ориентировкой оси сжатия и субширотной – оси растяжения (см. рис. 1). Такие ориентировки согласуются с



Рис. 2. Общее поле напряжений Южного и юга Центрального Сахалина. Оси локальных стресс-состояний: (*a*) – растяжения, (*б*) – сжатия; (*в*) – общее поле напряжений. Сетка Вульфа, верхняя полусфера.

1-2 – оси главных нормальных напряжений ЛСС: 1 – растяжения, 2 – сжатия; 3–5 – оси общего поля напряжений и плоскости их действия: 3 – растяжения, 4 – промежуточной, 5 – сжатия; 6–8 – плоскости действия максимальных касательных напряжений: 6 – полюс и вектор перемещения, 7–8 – простирания и кинематический тип: 7 – сбросо-сдвиг правый, 8 – сбросо-сдвиг левый.

Fig. 2. Common stress field of Southern Sakhalin and the southern part of Central Sakhalin. Local stress state axes: (*a*) – extension, (δ) – compression; (β) – common stress field. Wulff net, upper hemisphere.

1-2 – main normal stress axes (left-lateral strike-slip): 1 – extension, 2 – compression; 3-5 – axes of the common stress field and planes: 3 – extension, 4 – intermediate, 5 – compression; 6-8 – planes of maximum tangential stresses: 6 – pole and displacement vector, 7-8 – strike and kinematic type: 7 – right-lateral strike-slip with normal component, 8 – left-lateral strike-slip with normal component.

ориентировками современных тектонических напряжений по данным о механизмах очагов землетрясений в Западной Фенноскандии [Zoback, 1992], интерпретируемых как результат влияния процессов спрединга в Северной Атлантике.

4.2. Восточно-Европейская платформа

На территории ВЕП для реконструкции неотектонических напряжений использован комплекс методов, главными из которых являлись кинематический и структурно-геоморфологический. Субширотные ориентации осей сжатия, характерные для самой западной окраины Русской плиты, восстановлены СГ методом и при продвижении на восток вплоть до западной окраины Белорусской антеклизы (см. рис. 1). На остальной территории Русской плиты восстановлены субмеридиональные ориентации осей сжатия и субширотные – осей растяжения. Зоны влияния на плиту процессов спрединга в Арктике и орогенеза на Кавказе отразились в однородном поле тектонических напряжений.



Рис. 3. Сопоставление неотектонических напряжений с особенностями рельефа Польши (по [*Sim, 2000*]).

(a) – неотектонические напряжения, восстановленные структурно-геоморфологическим (CГ) методом. 1 – разломы: а – 1, 6 – II порядка; 2 – кинематические типы разломов: а - сдвиги, б - сбросы; 3 - оси сжатия в горизонтальной плоскости: а - I , б - II порядка; 4 - геодинамические обстановки формирования разломов: а - сжатия, б - растяжения; 5 – зона Тейссера-Торнквиста (TT); 6 – платформы: а – Западно-Европейская, 6 – Восточно-Европейская. (б) – 1 – депрессии; 2 – эскарпы (по: [Ostaficzuk, 1995]).

Fig. 3. Comparison between the neotectonic stresses and the relief of Poland (after [*Sim, 2000*])

(a) – neotectonic stresses reconstructed by the structural-geomorphological (SG) method. *1* – faults: a – 1st order, 6 – 2nd order; 2 – kinematic types of faults: a – strike-slip, 6 – normal fault; 3 – axes of compression in the horizontal plane: a – 1st order; 4 – geodynamic settings of faulting: a – compression, 6 – extension; 5 – Teisser-Tornquist zone (TT); 6 – platforms: a – West European, 6 – East European. (6) – 1 – depressions; 2 – escarps (after [*Ostaficzuk*, 1995]).



Рис. 4. Тектонические напряжения Балтийского щита.

1–2 – неотектонические напряжения: 1 – І, 2 – ІІ ранга, восстановленные кинематическим методом; 3 – разломы І ранга; 4 – сдвиги, восстановленные СГ методом; 5–7 – тектонические структуры: 5 – Балтийский щит, 6 – Русская плита, 7 – байкалиды (выход на дневную поверхность фундамента Тимано-Печорской плиты). КЗ – Кандалакшский залив.

Fig. 4. Tectonic stresses of the Baltic shield.

1-2 – neotectonic stresses: 1 - 1st rank, 2 - 2nd rank, reconstructed by the kinematic method; 3 – faults of the 1st rank; 4 – strike-slip faults reconstructed by the SG method; 5-7 – tectonic structures: 5 – Baltic shield, 6 – Russian plate, 7 – Baikalides (in the outcrops of the basement of the Timan-Pechora plate). K3 – Kandalaksha Gulf.

Ориентации осей Р [Vvedenskaya, 1969] единичных механизмов очагов землетрясений совпадают с реконструкциями осей главных нормальных напряжений СГ методом на Русской плите. Сдвиговое поле напряжений и ориентации осей сжатия СЗ простирания в пределах Донбасса совпадают с альпийским полем напряжений, восстановленным кинематическим методом В.А. Корчемагиным [Korchemagin, 1982]. Ориентации осей главных нормальных напряжений, реконструированные на востоке Русской плиты кинематическим методом [Kopp et al., 2014; Kopp, 2017], показывают значительное разнообразие ориентировок осей сжатия и растяжения, которые сложно сопоставлять с нашими данными изучения региональных напряжений СГ методом.

На Балтийском щите (рис. 4) кинематическим методом восстановлены тектонические напряжения I ранга на территории Карелии и серия общих полей II ранга, которые дали основание отнести Балтийский щит к западному типу напряженного состояния по аналогии с ЗЕП и западной частью Русской плиты [Sim et al., 2011]. В окрестностях Кандалакшского залива восстановлен геодинамический режим горизонтального растяжения, ориентированного поперек Кандалакшского реактивизированного грабена, что соответствует новейшей структуре. Определения напряжений II ранга Хибинского массива и вдоль трассы Мурманск -Апатиты, в которых поле характеризуется режимом горизонтального сжатия с крутой ориентацией оси растяжения, будут обсуждаться ниже.

Зона неустойчивых тектонических напряжений. Между областями с субширотной, характерной для ЗЕП, Балтийского щита и запада ВЕП (западный тип тектонических напряжений), и с субмеридиональными ориентировками осей сжатия (восточный тип) (рис. 5, *a*) выделяется зона неустойчивых неотектонических напряжений, состоящая из двух ветвей. Первая ветвь примерно совпадает на севере с границей между Балтийским щитом и Русской плитой, далее на юг она проходит субмеридионально по западному крылу Белорусской антеклизы практически до Восточных Карпат. В этой области большинство разломов формируется в обстановке растяжения. Кроме этого, по отдельным разломам восстанавливаются противоречивые направления сдвиговых смещений на одних и тех же отрезках разломов, соответственно ось сжатия может быть как широтной, так и меридиональной. Выделенная область приурочена к побережью Балтики [Sim et al., 1995; Sim, 1999, 2000], и на схеме проницаемости земной коры по данным гелиевых исследований [Eremeev, 1983] она совпадает с участками с максимальной проницаемостью. Это взаимосвязано с обстановкой растяжения в этой области, вероятно, вызванной процессами формирования молодых грабенов Балтийского щита. Смена ориентации оси сжатия предположительно может быть обусловлена попеременной активизацией грабенов субмеридионального Ботнического и широтного Финского залива. Механизмы очагов Осмуссаарского и Калининградского землетрясений, произошедших в этой области, с субширотной и субмеридиональной осями сжатия, соответственно, свидетельствуют о том, что специфика неотектонических напряжений в описываемой области характерна и для современного этапа.

На юго-западе Восточно-Европейской платформы выделена вторая ветвь неустойчивых неотектонических напряжений. Она является северной границей области, характеризующейся неустойчи-

выми ориентировками осей сжатия. Эта область охватывает Украинский щит и распространяется вплоть до юго-западных склонов Воронежской антеклизы. Природа такой неустойчивости требует дополнительных исследований. Граница областей с разными типами полей напряжений, а именно: субширотным сжатием в западных частях и субмеридиональным – в восточных частях платформ Евразии коррелируется с изменчивостью мощностей литосферы, теплового потока [Pavlenkova, 2006], поэтому можно утверждать, что восстановленные неотектонические напряжения связаны с глубинным строением исследованной территории. Этот тезис подтверждается и тем, что выделенная граница отчетливо отделяет сейсмичные и асейсмичные районы Восточно-Европейской платформы (рис. 5). Очаги землетрясений нанесены по работе [Sharov et al., 2007].

4.3. Западно-Сибирская плита (ЗСП)

Тектонические напряжения на Западно-Сибирской плите восстановлены СГ методом для всего севера плиты до широты 64° в масштабе 1:1000000. Как на этой территории, так и южнее для отдельных месторождений нефти и газа (Северо-Комсомольское, Русское, Ай-Пим, Большой Салым, Северо-Демьянское, Кальчинское и др.) было реконструировано неотектоническое напряженное состояние в масштабах 1:100000 и 1:50000 [Sim et al., 2008; Yurchenko, Sim, 2008; и др.] – на всех месторождениях, кроме Большого Салыма, восстановлены субмеридиональные ориентировки осей сжатия и субширотные - осей растяжения. Результаты реконструкции неотектонических напряжений для севера ЗСП (рис. 6) свидетельствуют о выдержанных ориентациях осей сжатия в субмеридиональном направлении. Данные интерпретаций результатов сейсмики 3D (трехмерное сейсмическое профилирование), показывающих сдвиги в структурах севера Западной Сибири [Gogonenkov et al., 2007], подтверждают наши результаты. На рис. 1 показаны оси сжатия сдвиговых тектонических напряжений, восстановленных на отдельных объектах 3СП.

4.4. Туранская плита

Район исследований находится сравнительно западнее зоны сочленения палеозойских и раннемезозойских складчатых сооружений Урала, Мангышлака, Тянь-Шаня и Центрального Казахстана, скрытой под покровом молодых платформенных осадков. Несмотря на сложное и разновозрастное строение фундамента, в этой части Туранской плиты СГ методом уверенно определяются субмеридиональ-



Рис 5. Схема районирования тектонических напряжений ВЕП и структур обрамления по типу напряженного состояния (*a*), сопоставление границы неустойчивых напряжений с тепловым потоком (б) и с сейсмичностью (в). (a) – 1–4 – границы: 1 – қрупнейших разломов, ограничивающих разновозрастный фундамент платформ, 2 – крупнейших структур платформ Северной Европы, 3 – орогенных структур, 4 – между областями с разными типами ориентировок осей главных нормальных напряжений; 5-8 – области разного типа напряженного состояния: 5 – с 3-В и 3С3 ориентацией осей сжатия, 6 – с C-Ю и субмеридиональной ориентацией осей сжатия, 7 – с нестабильной ориентацией осей сжатия, 8 – с обстановкой растяжения. (б) – границы неустойчивых неотектонических напряжений и тепловой поток. 1–2 – изолинии теплового потока: 1 – уверенные, 2 – предполагаемые (по [Gordienko, 1987]); 3–4 – крупнейшие разломы: 3 - рифтогенные, 4 - прочие; 5 - границы между областями с разными типами ориентировок осей главных нормальных напряжений. (в) - эпицентры землетрясений (по [*Sharov et al., 2007*]). Магнитуды землетрясений от 3.0 до 6.5. 5. Zoning of tectonic stresses in the West European plate and the frame structures by the stress state types (a). Comparison between the boundaries of the areas with unstable stress states and heat flow (δ) and seismicity (θ) Fig.

(*a*) – *1* – largest faults bordering the platform basements of different ages; *2* – boundaries of the largest platform structures in Northern Europe; *3* – boundaries of orogenic structures; *4* – boundaries between the regions with different orientations of the main normal stress axes; *5–8* – areas with different states of stress: *5* – E-W and WNW-oriented compression axes, *6* – N-S and submeridional compression axes, 7 - unstable orientation of compression axes, β - extension stress axes. (δ) - boundaries of the areas with unstable neotectonic stresses, and heat flow. 1–2 – heat flow isolines: 1 – confirmed, 2 – assumed (after [Gordienko, 1987]); 3–4 – largest faults: 3 – riftogenic, 4 – other; 5 – boundaries between the areas with different orientations of the main normal stress axes. (*b*) – earthquake epicenters (after [*Sharov et al., 2007*]). Earthquake magnitudes from 3.0 to 6.5.



Рис. 6. Неотектонические напряжения Западно-Сибирской плиты (по [Sim et al., 2007]).

1 – новейшие складчатые структуры: а – поднятия, б – впадины; 2 – границы валов (по [Zyatkova, 1979]): а – Нижнепуровского, б – Часельского; 3 – кольцевая структура (по [Sidorenko, 1980]); 4 – новейшие разломы: а – I ранга, б – прочие; 5 – кинематические типы разломов: а – сдвиги, б – сбросы (взбросы), зубцы в сторону опущенного крыла; 6 – ориентация оси сжатия в горизонтальной плоскости: а – I ранга, б – прочие; 7 – геодинамическая обстановка формирования разломов: а – растяжения, б – сжатия. Неотектонические структуры восстановлены по методике [Kostenko, 1999; Kostenko, Bryantseva, 2004].

Fig. 6. Neotectonic stresses of the West Siberian plate (after [Sim et al., 2007]).

1 – recent fold structures: a – uplifts, 6 – depressions; 2 – boundaries of soil bars (after [*Zyatkova, 1979*]): a – Nizhnepurovsky, 6 – Chaselsky; 3 – ring-shape structure (after [*Sidorenko, 1980*]); 4 – recent faults: a – 1st rank, 6 – other; 5 – kinematic types of faults: a – strike-slip, 6 – normal faults (upthrust), 'teeth' towards the lowered wing; 6 – orientation of the axis of compression in the horizontal plane: a – 1st rank, 6 – other; 7 – geodynamic setting of faulting: a – extension, 6 – compression. The neotectonic structures were reconstructed by the method described in [*Kostenko, 1999; Kostenko, Bryantseva, 2004*].

ные ориентации осей сжатия, которые формируют разломы северо-западного простирания как правые, а северо-восточного – как левые сдвиги (см. рис. 1). На исследованной части Туранской плиты установлено региональное сдвиговое поле тектонических напряжений, обусловленное влиянием орогенеза на Кавказе и Копет-Даге.

4.5. Восточно-Сибирская платформа (ВСП)

На территории Восточно-Сибирской платформы реконструкция неотектонических напряжений произведена СГ методом (с севера на юг) в зоне Норильско-Хараелахского разлома [Kalinin et al., 1995], Байкитской антеклизы, Иркинеево-Чадобецкого рифтогенного прогиба (ИЧРП) [Sim et al., 2016], Вилюйской синеклизы [Sim et al., 2016], Оленекского поднятия [Gordeev, 2016] и на других участках. В результате реконструкции неотектонических напряжений СГ методом по новейшим разломам I ранга на всех перечисленных участках, в том числе в ИркинеевоЧадобецком рифтогенном прогибе (ИЧРП) – самом южном участке ВСП, установлены сдвиговые неотектонические напряжения с субмеридиональными ориентировками осей сжатия и субширотными осями растяжения.

На восточной окраине ВСП проведена реконструкция неотектонических напряжений на Оленекском поднятии [Gordeev, 2016] и в пределах Вилюйской синеклизы [Sim et al., 2016]. Оленекское и расположенное южнее Мунское новейшие поднятия являются положительными структурами фундамента, развивавшимися с протерозоя как поднятия. По этим поднятиям СГ методом восстановлены радиально расходящиеся ориентировки горизонтальных осей сжатия (рис. 7), показывающие, что эти структуры формируются под воздействием внутриплатформенных источников деформирования по аналогии со структурами ВЕП. В восточном обрамлении ВСП восстановлены ориентировки осей сжатия, нормальные к границе орогенных структур Верхоянья, что дает возможность гово-



Рис. 7. Схема неотектонических напряжений восточной окраины Восточно-Сибирской платформы.

1-3 – оси сжатия в горизонтальной плоскости, восстановленные структурно-геоморфологическим методом, характеризующие: 1 – разломы, 2 – влияние сводовых поднятий, 3 – влияние орогена на платформенные структуры; 4 – сдвиги; 5-6 – локальные геодинамические обстановки: 5 – сжатия, 6 – растяжения; 7 – разрывные структуры; 8-9 – структуры фундамента: 8 – поднятия, 9 – грабены.

Fig. 7. Schematic map showing neotectonic stresses of the eastern margin of the East Siberian platform.

1-3 – axes of compression in the horizontal plane. The axes are reconstructed by the structural-geomorphological method and characterize: 1 – faults, 2 – influence of dome uplifts, 3 – influence of the orogen on the platform structures; 4 – strike-slip faults; 5-6 – local geodynamic settings: 5 – compression, 6 – extension; 7 – rupture structures; 8-9 – structures of the basement: 8 – uplifts, 9 – grabens.

рить о влиянии орогенеза в Верхоянье на напряженное состояние ВСП.

5. НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОРОГЕННЫХ СТРУКТУР СЕВЕРА ЕВРАЗИИ

5.1. Восточные Карпаты и Горный Крым

Восточные Карпаты и Горный Крым были исследованы кинематическим методом с применением программного обеспечения, разработанного в Институте геофизики НАН Украины и Донецком государственном техническом университете [Gintov et al., 2002]. ЛСС, восстановленные в Восточных Карпатах, показали, что преобладают тектонические напряжении взбросового типа, которые сопровождаются осями субмеридионального и северо-восточного простирания. В пределах Горного Крыма неотектонические напряжения были восстановлены СГ методом. Ось сжатия I ранга ориентирована в ЗСЗ направлении [Sim et al., 1999; Sim, 2000]. Более поздние исследования напряженнодеформированного состояния в Горном Крыму подтвердили «...преобладание в Горном Крыму на завершающих этапах орогенеза сдвиговых деформационных режимов, тогда как сбросовый и особенно взбросовый режимы выражены недостаточно ярко» [Gintov et al., 2002, с. 88]. В этом же исследовании было подчеркнуто, что в сбросовом и взбросовом режимах множество крутых осей сжатия и растяжения близки к предельному углу наклона к горизонту 45°. Это увеличивает достоверность утверждения о сдвиговом геодинамическом режиме в Горном Крыму на последних этапах становления рельефа территории. В Восточном Горном Крыму СВ направление доскладчатых обстановок сжатия сопоставляется с соскладчатым сжатием на СЗ Кавказе в позднем эоцене – олигоцене [Gonchar, 2017].

5.2. Северо-Западный Кавказ

Изучение разрывной тектоники региона привело к представлению складчатого сооружения Северо-Западного Кавказа в виде транспрессионной правосдвиговой дизъюнктивной зоны [Rastsvetaev, 1977]. Субмеридиональное сжатие реконструировано и при изучении структурных парагенезов Минераловодского района Большого Кавказа [Milanovsky et al., 1989]. Исследования тектонических напряжений, охватывающие весь Кавказский регион, проведены П.Н. Николаевым [Nikolaev, 1992]. Автором выделены три ранга новейших тектонических напряжений. Для региональных тектонических напряжений Кавказа и Ирана (I ранга) определен сдвиговый геодинамический режим с север-северовосточным субгоризонтальным сжатием и западсеверо-западным растяжением. Тектонические напряжения Кавказа, восстановленные СГ методом, показали, что все структуры деформируются на неотектоническом этапе в сдвиговом поле напряжений с север-северо-западной и меридиональной ориентацией осей сжатия и, соответственно, широтной и восток-юго-восточной ориентацией осей растяжения (см. рис. 1). В результате этих реконструкций на западном и восточном погружениях Кавказа были восстановлены обстановки дополнительного растяжения, что обусловлено развитием Черноморской и Каспийской впадин [Sim, 2000].

С помощью метода катакластического анализа структурно-кинематической информации о перемещениях по поверхности дизъюнктивов (зеркал скольжения и малых разрывов) получены данные об ориентации осей главных напряжений и типе напряженного состояния для основных тектонических структур региона. Поскольку результаты опубликованы в серии статей [Marinin, 2013; Marinin, Sim, 2015; Marinin et al., 2016; Marinin, Tveritinova, 2016], мы остановимся на основных итогах, важных для строения орогенных поясов Евразии.

На западном погружении мегантиклинория Большого Кавказа и вблизи ограничивающих его

поперечных флексурно-разломных зон реконструированы локальные стресс-тензоры, показывающие существенную перестройку здесь как ориентировок осей главных напряжений, так и типа напряженного состояния (рис. 8). Здесь определены условия для образования систем отрывов СВ-ЮЗ простирания и доказано полевыми структурными методами удлинение в СЗ-ЮВ направлении. Результаты реконструкции ориентировок осей растяжения также указывают на их СЗ-ЮВ ориентировку. Хорошо выраженный многоэтапный режим СЗ-ЮВ растяжения установлен в пределах Семисамской антиклинали. Деформации удлинения вдоль оси складчатого сооружения проявлены на разных масштабах исследованных структур, в некоторых из них удалось определить и величины относительного удлинения.

В пограничной области между складчатым сооружением Северо-Западного Кавказа и поперечным к нему Керченско-Таманским прогибом установлен характер изменения ориентировок осей главных нормальных напряжений. Эти изменения приводят к смене обстановок горизонтального сжатия и горизонтального сдвига (с СВ сжатием), преобладающих на Кавказе, обстановками горизонтального растяжения. Так, к западу от погружающихся складчатых структур Кавказа в отложениях миоцена зафиксирована обстановка ССЗ сжатия с крутыми наклонами осей максимальных сжимающих напряжений.

В пределах Туапсинской сдвиговой зоны Северо-Западного Кавказа показано наличие сдвиговых перемещений разного масштаба и преобладание обстановки горизонтального сдвига (рис. 8). Пространственные вариации положения осей главных напряжений укладываются в единый этап с преобладанием максимального сжатия, ориентированного в субмеридиональном направлении. При этом к востоку от Туапсинской сдвиговой зоны преобладают обстановки горизонтального сжатия с субвертикальной осью растяжения (σ₁) и субгоризонтальной осью максимального сжатия (оз) северовосточной ориентировки (до ССВ), что согласуется со взбросовыми и надвиговыми смещениями вблизи Бекишейского разлома, имеющими ЗСЗ простирание и падение на ССВ. В пределах самой зоны распространены правосдвиговые смещения субмеридионального простирания, образование которых связано с обстановкой горизонтального сдвига (оси σ₁ и σ₃ субгоризонтальны) при СВ направлении максимального сжатия.

Проведенная реконструкция тектонических напряжений показывает, что выдержанные направления и углы погружения осей максимальных сжимающих напряжений имеют характерные области распространения (локализации). В переходных



Рис. 8. Схема реконструированных направлений максимального сжатия и типов напряженного состояния Северо-Западного Кавказа.

1–7 – области распространения отложений: 1 – антропогена, 2 – палеогена – неогена, 3 – верхнего мела, 4 – нижнего мела, 5 – верхней юры, 6 – нижней и средней юры, 7 – палеозоя; 8 – разрывные нарушения; 9–14 – направления максимального сжатия σ₃ и типы напряженного состояния: 9 – горизонтального растяжения (показана ориентировка промежуточной оси σ₂), 10 – горизонтального растяжения в сочетании со сдвигом, 11 – горизонтального сдвига, 12 – горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом, 13 – горизонтального сжатия, 14 – сдвига в вертикальной/горизонтальной плоскости (в терминах механики разрушения); 15 – диаграммы распределения типов напряженного состояния по районам Северо-Западного Кавказа.

Fig. 8. Schematic map showing the reconstructed directions of maximum compression and the types of the stress state of the North Western Caucasus.

1-7 – sedimentation areas: 1 – Anthropogen, 2 – Paleogene – Neogene, 3 – Upper Cretaceous, 4 – Lower Cretaceous, 5 – Upper Jurassic, 6 – Lower – Middle Jurassic, 7 – Paleozoic; 8 – ruptures; 9-14 – directions of maximum compression σ_3 , and stress state types: 9 – horizontal extension (also shown is the orientation of intermediate axis σ_2), 10 – horizontal extension in combination with shearing, 11 – horizontal shearing, 12 – horizontal compression in combination with shearing, 13 – horizontal compression, 14 – shearing in the vertical / horizontal plane (in terms of fracture mechanics); 15 – diagrams of the distribution of the stress state types in the regions of the North–Western Caucasus.

Туапсинской, Геленджикской и Анапской флексурно-разломных зонах мы наблюдаем быстрые изменения в ориентации оси максимального сжатия (рис. 8). Если рассматривать геологический эффект деформирования орогенного пояса, то во всех этих структурах происходит смена преимущественного укорочения в северо-восточном направлении на несколько меньшее укорочение в этом направлении и большее укорочение либо в субвертикальном (в областях с обстановкой горизонтального растяжения), либо в северо-западном направлении. В первом случае за Анапско-Джигинской зоной мы видим смену обстановки горизонтального сжатия обстановкой горизонтального растяжения Керченско-Таманской области. Во втором случае мы наблюдаем поперечные складчатые и разрывные структуры «антикавказского» ВСВ простирания, обусловленные ССЗ направлением действия оси максимального сжатия (σ_3), а промежуточная ось (σ_2) приобретает здесь СВ направление. Можно сделать вывод, что для территории Северо-Западного Кавказа характерны территориальные изменения параметров напряженного состояния, выражающиеся в изменении ориентации осей главных напряжений и смене геодинамического типа напряженного состояния. Быстрые и существенные изменения происходят вблизи крупных элементов тектонической структуры Северо-Западного Кавказа.

5.3. Северный Тянь-Шань

Исследование тектонических напряжений Северного Тянь-Шаня проведено в пределах Киргизского хребта (рис. 9). Целью исследований являлась реконструкция тектонических напряжений по геологическим стресс-индикаторам и последующее сопоставление полученных результатов с современным напряженным состоянием региона, восстанавливаемым по сейсмологическим данным.

В зоне неотектонических поднятий Северного Тянь-Шаня реконструированы локальные стресссостояния, обобщение которых показало, что обстановки горизонтального растяжения часто фиксируются на участках, приуроченных к перегибу между Киргизским хребтом и Чуйской впадиной [Marinin et al., 2016]. В пределах собственно Киргизского хребта, совпадающего с одноименной мегантиклиналью, установлено преобладание обстановок горизонтального сжатия с ССЗ ориентировкой оси сжатия (до меридиональной). Вместе с тем область Киргизского хребта характеризуется разными типами напряженного состояния и значительными вариациями направлений главных напряжений. В западной исследованной части Киргизского хребта не наблюдается четкого преобладания определенного типа режима, но ее особенностью является наличие взрезовых и пологих надвиговых типов нарушений (субгоризонтальна ось σ₂). Для области характерны оси максимального сжатия, погружающиеся к северу (рис. 9). Для второй (центральной) области характерны режимы горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом, а оси сжатия также погружаются на север. В восточной части Киргизского хребта заметно преобладают режимы горизонтального сдвига (оси σ_1 и σ_3 имеют близгоризонтальное положение), а оси сжатия ориентированы в ССЗ направлении.

Западная область характеризуется практически равным количеством локальных стресс-состояний

всех геодинамических типов напряженного состояния. Распространение в центральной области обстановок горизонтального растяжения связано, по всей видимости, с положением большинства точек наблюдения вблизи границы Киргизского хребта и Чуйской впадины, что может быть обусловлено: 1) изменением типа напряженного состояния в переходной зоне этих двух крупных новейших геодинамических структур; 2) изменением первоначального положения геологических стресс-индикаторов в этой переходной зоне (в результате которого массив горных пород, в котором проводились измерения, на новейшем этапе оказался круто наклонен).

В восточной области преобладающим типом напряженного состояния является горизонтальный сдвиг. При движении запада на восток вдоль Киргизской мегантиклинали увеличивается роль стресс-тензоров, сформированных в обстановке горизонтального сдвига. Рассмотренные области Киргизского хребта различаются и по строению современного рельефа [*Chedia, 1986*]. Западнее долины р. Аксу наблюдается развитие довольно пологого склона при отсутствии предгорий. Центральной области (район НС РАН) присущи максимальные значения высоты водораздела хребта (до 4855 м), а в восточной части высоты понижаются и происходит разворот горного поднятия в юговосточном направлении.

Впервые для Северного Тянь-Шаня восстановлены общие (усредненные) неотектонические напряжения, отличающиеся для поднятий и впадин – деформирование положительных структур в новейший этап происходит в обстановке горизонтального сжатия с меридиональной ориентацией оси сжатия и субвертикальной осью растяжения, а во впадинах – в обстановке горизонтального растяжения с вертикальной осью сжатия и субгоризонтальной осью растяжения, ориентированной на север-северо-восток. Неотектонический геодинамический режим во впадинах и поднятиях согласуется с характеристиками современного напряженного состояния, восстановленного по сейсмологическим данным [*Rebetsky*, 2015].

5.4. Монголо-Охотский складчатый пояс (Юго-Восточное Забайкалье)

В этом регионе изучение неотектонических напряжений СГ методом проведено в пределах вулканотектонической Стрельцовской кальдеры. Реконструкция напряженного состояния в окружающих кальдеру структурах, которое не было охарактеризовано на этот момент времени, произведена СГ методом.

В результате исследований неотектонических напряжений установлено, что массивы пород де-





1-9 – ступени суммарных деформаций (по [*Chedia, 1988*]) доорогенной (доверхнеолигоценовой) выровненной поверхности: более 4000 м (1), от 3000 до 4000 м (2), от 2000 до 3000 m (3), or 1000 до 2000 m (4), or 0 до 1000 m (5), or 0 до -1000 m, or -1000 до -2000 m (6), or -2000 до -3000 m (7), or -3000 до -4000 m (8), -4000 m и менее (9); 10-12 - точки вых диаграммах – выходы осей растяжения и сжатия локальных стресс-состояний (сетка Вульфа, верхняя полусфера), реконструированные методом катакластического анас реконструированными параметрами тектонических напряжений, принадлежащих западной (10), центральной (11) и восточной (12) области Киргизского хребта. На круголиза по трем вышеуказанным областям: 13–14 – плотностные максимумы распределения осей растяжений (13) и сжатия (14); 15–16 – оси растяжения (15), сжатия (16).

Fig. 9. Neotectonic stresses of the Northern Tien Shan (after [Sim et al., 2014; Marinin et al., 2016].

1-9 - degrees of total deformation (after [Chedia, 1988]) of the pre-orogenic (pre-Upper Oligocene) leveled surface: more than 4000 m (1), 3000 to 4000 m (2), 2000 to 3000 m (3), 1000 to 2000 m (4), 0 to 1000 m (5), 0 to -1000 m, -1000 to -2000 m (6), -2000 to -3000 m (7), -3000 to -4000 m (8), -4000 m and less (9); 10-12 - points with the reconstructed parameters stress states (Wulff net, the upper hemisphere). Reconstructions by the cataclastic analysis for the three above-mentioned parts: 13–14 – density maximum in the distribution of the axes of tectonic stresses belonging to the western (10), central (11) and eastern (12) parts of the Kirghiz ridge. The circle diagrams show the axes of extension and compression for the local of extension (13) and compression (14); 15 - axes of extension; 16 - axes of compression. формируются в неотектонический этап в сдвиговом поле напряжений с осями сжатия, ориентировка которых изменяется от субмеридиональной до СВ [Petrov et al., 2010]. Главную структуроформирующую роль на новейшем этапе играют разломы I ранга СВ-ЮЗ простирания, отделяющие отчетливо выраженную впадину Сухой Урулюнгуй (погруженный северо-западный блок кальдеры) от расположенного на юго-восток от нее горстообразного поднятия (собственно Стрельцовская кальдера). По сравнению с разломами СВ простирания ортогональные разломы І ранга существенно более «разбиты», а по выраженности разломов в рельефе можно сказать, что меридиональные и широтные разломы древнее разломов СВ простирания. Наиболее молодыми активизированными и, возможно, сформированными в неотектонический этап являются разломы СЗ-ЮВ простирания, в целом секущие и смещающие прочие разломы [Petrov et al., 2010]. Общей характеристикой неотектонических напряжений района исследований является геодинамическая обстановка сжатия и трехосное напряженное состояние. На самом северо-востоке района в окрестностях пос. Досатуй восстановлена геодинамическая обстановка растяжения, которая должна определять уникальные по отношению к другим частям района гидрогеологические условия.

5.5. Сахалин

Остров Сахалин является особой структурой в Северной Евразии, так как по нему проводится граница между Амурской и Охотской самостоятельно вращающимися микроплитами, расположенными между крупнейшими литосферными плитами Земли: Евразийской, Североамериканской и Тихоокеанской. Граница между двумя наиболее крупными микроплитами - Амурской и Охотской (Охотоморской) – рядом исследователей проводится по меридиональному крупнейшему Центрально-Сахалинскому (Тымь-Поронайскому) разлому [Golozubov et al., 2012]. Целью исследований тектонических напряжений на острове являлось определение особенностей новейшей геодинамики острова и различий в новейшем и современном поле тектонических напряжений в западной (Амурской) и восточной (Охотской) микроплитах для подтверждения границы между ними, ассоциируемой с зоной Центрально-Сахалинского разлома. На юге Центрального и на Южном Сахалине ЛСС восстанавливались комплексом структурных и тектонофизических методов. На рис. 10 представлены ЛСС, восстановленные кинематическим методом и методом выделения сколовых сопряженных трещин. ЛСС с режимом горизонтального растяжения (стереограммы синего цвета на рис. 10) приурочены к впадинам Татарского пролива и Охотского моря. По этим определениям уверенно восстановлено общее поле тектонических напряжений всей изученной части, представленной на рис. 2 и на рис. 11. Региональные новейшие тектонические напряжения Центрального и Северного Сахалина изучались СГ методом. В результате работ составлена структурно-геоморфологическая карта и схема новейшей геодинамики Сахалина (рис. 11). На последней произведено районирование областей с разной геодинамической обстановкой формирования разломов в новейший этап. На границах выделенных районов с разной геодинамической обстановкой происходит флуктуация ориентировок осей современных девиаторных напряжений максимального сжатия и максимального растяжения, определенных

Рис. 10. Локальные тектонические напряжения Южного и прилегающих районов Центрального Сахалина (по [Sim et al., 2017]) и схема геологического строения (по [Golozubov et al., 2012], упрощено).

1-4 – комплексы разновозрастных образований: 1 – альбские и верхнемеловые терригенные, частью туфово-терригенные, 2 – палеоцен-миоценовые терригенные, реже – вулканогенные, 3 – миоцен-четвертичные терригенные, 4 – палеоценовые базальтоиды; 5 – меловые и палеоцен-эоценовые аккреционные комплексы Сусунайского, Тонино-Анивского террейнов; 6 – разломы; 7-9 – геодинамические режимы ЛЛС: 7 – горизонтального растяжения, 8 – сдвиговые, 9 – горизонтального сжатия. На стереограммах показаны оси главных нормальных (σ₁ – минимальных, σ₂ – промежуточных, σ₃ – максимальных сжимающих) напряжений и плоскости действия максимальных касательных напряжений с векторами перемещения отсутствующего крыла (сетка Вульфа, верхняя полусфера).

Fig. 10. Local tectonic stresses of the South Sakhalin and the adjacent areas of the Central Sakhalin (after [*Sim et al., 2017*]), and the schematic map showing the geological structure (modified after [*Golozubov et al., 2012*]).

1-4 – complexes of hererochronous formations: 1 – Albian and Upper Cretaceous terrigenous, partly tuff-terrigenous, 2 – Paleocene-Miocene terrigenous, rare volcanogenic, 3 – Miocene-Quaternary terrigenous, 4 – Paleocene basaltoids; 5 – Cretaceous and Paleocene-Eocene accretionary complexes of the Susunai, Tonino-Aniva terranes; 6 – faults; 7-9 – geodynamic settings: 7 – horizontal extension, 8 – shearing, 9 – horizontal compression. The stereograms show the axes of the main normal stresses (σ_1 – minimum, σ_2 – intermediate, σ_3 – maximum compression) and the planes of maximum tangential stresses with the displacement vectors of the missing wing (Wulff net, upper hemisphere).





Рис. 11. Неотектонические напряжения и схема неотектонического районирования Сахалина.

(*a*) – неотектонические напряжения. *1–3* – неотектонические структуры: *1* – разломы, *2–3* – границы структур: *2* – I, 3 – II ранга; *4* – ориентация осей сжатия в зоне разломов, сформированных в разной геодинамической обстановке: а – чистого сдвига (трехосного напряженного состояния), б – сжатия, в – растяжения; *5* – оси общего поля напряжений Южного и прилегающих районов Центрального Сахалина: а – растяжения, б – сжатия. Цифры в кружках – разломы: 1 – Центрально-Сахалинский (Тымь-Поронайский), 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Верхнепильтунский, 4 – Набильский. Римские цифры: I – Шмидтовское поднятие, II – Западно-Сахалинское поднятие, III – Восточно-Сахалинское поднятие, IV – Центрально-Сахалинская впадина, V – Сусунайское поднятие. (*6*) – схема районирования областей с разной геодинамической обстановкой. *6–8* – ориентация осей сжатия с разной геодинамической обстановкой: *6* – растяжения, *7* – чистого сдвига, *8* – сжатия; *9* – сдвиги (на рис. 11, *a*); *10* – оси общего поля напряжений Южного и прилегающих районов Центрального Сахалина: а – растяжения, б – сжатия; *11* – траектории осей сжатия; *12* – границы областей с разной геодинамической обстановкой, *13–15* – области с разными геодинамическими обстановками: *13* – чистого сдвига, *14* – растяжения, *15* – сжатия.

Fig. 11. Neotectonic stress map, and the neotectonic zoning scheme of Sakhalin Island.

(a) – neotectonic stresses. 1–3 – neotectonic structures: 1 – faults, 2–3 – boundaries of structures: 2 – 1st rank, 3 – 2nd rank; 4 – orientations of the axes of compression in the zone of faults formed in different geodynamic settings: a – pure shear (triaxial stress state), 6 – compression, B – extension; 5 – axes of the common stress field of the South Sakhalin and the adjacent areas of the Central Sakhalin: a – extension, 6 – compression. The faults are marked by numbers in the circles: 1 – Central Sakhalin (Tym-Poronai), 2 – Hokkaido–Sakhalin, 3 – Verhnepiltunsky, 4 – Nabilsky. Roman numerals: I – Schmidt Uplift, II – Western Sakhalin Uplift, III – Eastern Sakhalin Uplift, IV – Central Sakhalin Basin, V – Susunai Uplift. (6) – zoning by geodynamic settings. 6-8 – orientations of the axes of compression in different geodynamic settings: 6 – extension, 7 – pure shear, 8 – compression; 9 – shearing (see Fig. 11, *a*); 10 – axes of the common stress field of the South Sakhalin and the adjacent areas of the Central Sakhalin: a – extension, 6 – compression; 11 – trajectories of compression axes; 12 – boundaries of areas with different geodynamic settings; 13–15 – areas with different geodynamic settings: 13 – pure shear, 14 – extension, 15 – compression.

П.А. Саввичевым по механизмам очагов землетрясений [Sim et al., 2017]. По всему острову как на современном, так и на новейшем этапе ось максимальных сжимающих главных нормальных напряжений регионального уровня ориентирована субширотно с небольшими отклонениями. Таким образом, относительная однородность регионального неотектонического и современного полей напряжений не дает основания различать напряженное состояние коры с разных сторон от Центрально-Сахалинского разлома и, как следствие, не позволяет проводить по этому разлому границу между Амурской и Охотоморской плитами. Сдвиговое поле напряжений по всему полуострову противоречит выводу предшественников о повсеместной смене соскладчатого сдвигового поля напряжений на взбросовое на орогенном этапе развития территории.

6. Заключение

1. Установлены зоны влияния процессов спрединга в Северной Атлантике и Арктике на напряженное состояние платформ.

2. Граница влияния процессов спрединга в Северной Атлантике и Арктике является барьером для современной сейсмичности на Восточно-Европейской платформе и выражается как зона неустойчивых тектонических напряжений.

3. Установлены внутриплатформенные источники тектонических напряжений на кольцевых

структурах Хибинского массива, Оленекском и Мунском поднятиях. Предполагается, что эти источники являются остаточными гравитационными напряжениями.

4. Тектонические напряжения в альпийских орогенных структурах на Кавказе, Тянь-Шане в целом согласуются с концепцией тектоники плит, определяющей субмеридиональное и пологое сжатие.

5. На Сахалине неотектоническое напряженнодеформированное состояние с субширотным сжатием и субмеридиональным растяжением целиком обусловлено движением Тихоокеанской и Амурской микроплит.

6. Предположительно прослежено влияние орогенных процессов в Верхоянском хребте на тектонические напряжения восточной окраины Восточно-Сибирской платформы.

7. Полевыми тектонофизическими исследованиями подтверждены теоретически показанные различия неотектонических напряжений в крупных структурах: для крупных поднятий характерен режим горизонтального сжатия и сдвиговый режим (Кольский п-ов, Фенноскандинавский щит, Киргизский хр., о. Сахалин), а для впадин – режим горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом (Кандалакшский грабен, Чуйская впадина, впадина Татарского залива и Охотского моря).

8. Во всех крупных платформенных структурах Северной Евразии (Западно-Европейская, Скифская, Тимано-Печорская, Туранская и Западно-Сибирская молодые плиты; Восточно-Европейская и Сибирская древняя платформы) на новейшем этапе доминирует региональное сдвиговое поле тектонических напряжений.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность Д.В. Жирову, Н.А. Сычевой, В.Н. Сычеву, С.И. Кузико-

8. Литература / References

- *Angelier J.,* 1975. Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites faillés: l'utilité d'une confrontation entre les méthodes dynamiques et cinématiques // *Bulletin de la Société géologique de France* 281, 1805–1808.
- Angelier J., 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. Tectonophysics 56 (3–4), T17–T26. https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90081-7.
- Angelier J., Saintot A., Ilyin A., Rebetsky Y., Vassiliev N., Yakovlev F., Malutin S., 1994. Relations entre champs de contraintes et deformations le long d'une chaine compressive-decrochante: Crimee et Caucase (Russie et Ukraine). Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes 319 (3), 341–348.
- Bankwitz P., Bankwitz E., 1984. Die Symmetrievon Klueftoberflaechen und ihre Nutzung fuer eine Palaeospannungsanalyse. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 12, 305–334.
- *Chedia O.K.* (Ed.), 1988. Modern Tectonics of the Kirghiz SSR. Map scale 1:500000. 10 sheets. In: Natural Resources of the Kirghiz SSR. Atlas. State Department of Geology and Cartography in the USSR Council of Ministers (in Russian) [Новейшая тектоника Киргизской ССР. Карта масштаба 1:500000 на 10 листах // Природные ресурсы Киргизской ССР. Атлас / Ред. О.К. Чедия. М.: ГУГК при СМ СССР, 1988].
- *Chedia O.K.*, 1986. Morphostructure and Modern Tectogenesis of the Tien Shan. Ilim, Frunze, 314 p. (in Russian) [*Чедия О.К.* Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим, 1986. 314 с.].
- Cheremnykh A.V., 2006. Structure and stress field of faulted crust on the eastern side of Lake Baikal. Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics) 47 (2), 257–264.
- Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrakhmatov K.E., 2013. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai–Sayan and Tien Shan belts in Central Asia. *Tectonophysics* 602, 194–222. https:// doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.010.
- Delvaux D., Moeys R., Stapel G., Melnikov A., Ermikov V., 1995. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution. *Tectonophysics* 252 (1–4), 61–101. https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00090-9.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V., 1997. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II. Cenozoic rifting. *Tectonophysics* 282 (1–4), 1–38. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00210-2.
- *Eremeev A.N.* (Ed.), 1983. Crustal Permeability Schematic Map of the European Part of the USSR Based on Helium Data. Scale 1:2500000. Moscow (in Russian) [Схема проницаемости земной коры Европейской части СССР по данным гелиевых исследований. Масштаб 1:2500000 / Ред. А.Н. Еремеев. М., 1983].
- Gintov O.B., Isai V.M., 1984a. Some regularities of faulting and the method of morpho-kinematic analysis of fractures. Part 1. Geophysical Journal (3), 3–10 (in Russian) [Гинтов О.Б., Исай В.М. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов. 1 // Геофизический журнал. 1984. № 3. С. 3–10].
- Gintov O.B., Isai V.M., 1984b. Some regularities of faulting and the method of morpho-kinematic analysis of fractures. Part 2. Geophysical Journal (4), 3–14 (in Russian) [Гинтов О.Б., Исай В.М. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов. 2 // Геофизический журнал. 1984. № 4. С. 3–14].
- Gintov O.B., Korchemagin V.A., Sim L.A., 2002. Ukrainian Carpathians and Mountainous Crimea similarity and difference in the kinematic characteristics of tectonic movements (tectonophysical analysis). Geophysical Journal 24 (6), 75–92 (in Russian) [Гинтов О.Б., Корчемагин В.А., Сим Л.А. Украинские Карпаты и Горный Крым – сходство и различие кинематических характеристик тектонических движений (тектонофизический анализ) // Геофизический журнал. 2002. Т. 24. № 6. С. 75–92].
- Gladkov A.S., Bornyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A., 2008. Tectonophysical Studies in Diamond Prospecting. Nauchny Mir, Moscow, 175 p. (in Russian) [Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах. М.: Научный мир, 2008. 175 с.].
- Gogonenkov G.N., Kashik A.S., Timursiyev A.I., 2007. Horizontal displacements of West Siberia's basement. Geologiya Nefti i Gaza (Oil and Gas Geology) (3), 3–11 (in Russian) [Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–11].

ву, Л.М. Расцветаеву, Т.Ю. Тверитиновой за поддержку при проведении полевых исследований; Ю.Л. Ребецкому за конструктивное обсуждение результатов работ. Полевые работы выполнены при частичной поддержке РФФИ (проекты 07-05-51379-офи_ц; 09-05-00007; 09-05-00687-а; 12-05-10059к; 12-05-00234-а; 12-05-00550-а; 13-05-10066к; 14-05-10035-к; 15-05-06857-а; 15-05-10138-к).

- *Golozubov V.V., Kasatkin S.A., Grannik V.M., Nechayuk A.E.*, 2012. Deformation of the Upper Cretaceous and Cenozoic complexes of the West Sakhalin terrane. *Geotectonics* 46 (5), 333–351. https://doi.org/10.1134/S001685211 2050020.
- Gonchar V.V., 2017. East Mountain Crimea strain fields of different age. *Geophysical Journal* 39 (1), 61–78 (in Russian) [Гончар В.В. Разновозрастные поля напряжений Восточного Горного Крыма // Геофизический журнал. 2017. Т. 39. № 1. С. 61–78]. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94011.
- Goncharov M.A., Raznitsin Yu.N., Barkin Yu.V., 2012. Specific features of deformation of the continental and oceanic lithosphere as a result of the Earth core northern drift. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (1), 27–54 (in Russian) [Гончаров М.А., Разницин Ю.Н., Баркин Ю.В. Особенности деформации континентальной и океанической литосферы как следствие северного дрейфа ядра Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т.З. № 1. С. 27–54]. https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-1-0060.
- Gordeev N.A., 2016. Tectonophysical analysis of the lineaments of the Olenek uplift. In: Tectonophysics and top problems of Earth sciences. Proceedings of the All-Russia conference. V. 1. IPE RAS, Moscow, p. 48–52 (in Russian) [Гордеев Н.А. Тектонофизический анализ линеаментов Оленекского поднятия // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2016. С. 48–52].
- Gordienko V.V. (Ed.), 1987. Heat Flow Map of Europe. Scale 1:6000000. Naukova Dumka, Kiev (in Russian) [Карта теплового потока Европы. Масштаб 1:6000000 / Ред. В.В. Гордиенко. Киев: Наукова думка, 1987].
- Grachev A.F., 1996. Main problems of neotectonics and geodynamics of Northern Eurasia. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 32 (12), 925–954.
- Gusev G.S., 1979. Fold Structures and Faults of the Verkhoyansk-Kolyma System of Mesozoids. Nauka, Moscow, 208 p. (in Russian) [Гусев Г.С. Складчатые структуры и разломы Верхояно-Колымской системы мезозоид. М.: Наука, 1979. 208 с.].
- Gushchenko O.I., 1973. Analysis of orientations of tectonic fracture displacements and their tectonophysical interpretation in paleostress reconstruction. *Doklady AN SSSR* 210 (2), 331–334 (in Russian) [Гущенко О.И. Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // Доклады АН СССР. 1973. Т. 210. № 2. С. 331–334].
- Gushchenko O.I., 1979. The method of kinematic analysis of destruction structures in reconstruction of tectonic stress fields. In: A.S. Grigoriev, D.N. Osokina (Eds.), Fields of stress and strain in the lithosphere. Nauka, Moscow, p. 7–25 (in Russian) [Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере / Ред. А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. М.: Наука, 1979. С. 7–25].
- Gushchenko O.I., Sim L.A., 1974. Basis for the method for reconstructing the stress state of the Earth's crust from orientations of tectonic shear displacements (according to geological and seismological data). In: Mechanics of the lithosphere. Abstracts of the All–Union scientific–technical meeting. Leningrad–Moscow, p. 5–8 (in Russian) [Гущенко О.И., Сим Л.А. Обоснование метода реконструкции напряженного состояния земной коры по ориентировкам сдвиговых тектонических смещений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Механика литосферы: Тезисы докладов Всесоюзного научно–технического совещания. Л.–М., 1974. С. 5–8].
- *Gzovsky M.V.*, 1954. Tectonic stress fields. *Izvestiya AN SSSR, Geophysical Series* (5), 390–410 (in Russian) [Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений // Известия АН СССР, серия геофизическая. 1954. № 5. С. 390–410].
- Gzovsky M.V., 1975. Fundamentals of Tectonophysics. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 c].
- *Homberg C., Bergerat F., Philippe Y., Lacombe O., Angelier J.*, 2002. Structural inheritance and Cenozoic stress fields in the Jura fold-and-thrust belt (France). *Tectonophysics* 357 (1–4), 137–158. https://doi.org/10.1016/S0040-1951 (02)00366-9.
- Kalinin E.V., Kovalko V.V., Mogilevtsev V.A., Panasyan L.L., Sim L.A., Shirokov V.N., 1995. Comprehensive study of the stress state of rock massifs during exploration of mineral deposits. Bulletin of Moscow State University. Series 4: Geology (2), 75–89 (in Russian) [Калинин Э.В., Ковалко В.В., Могилевцев В.А., Панасьян Л.Л., Сим Л.А., Широков В.Н. Комплексное изучение напряженного состояния массивов горных пород при разведке месторождений полезных ископаемых // Вестник Московского государственного университета. Серия 4: геология. 1995. № 2. С. 75–89].
- *Khain V.E., Lomize M.G.*, 1995. Geotectonics and Fundamentals of Geodynamics. MSU, Moscow, 480 p. (in Russian) [*Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ, 1995. 480 с.].
- *Khubaeva O.R., Bryantseva G.V., Sim L.A.,* 2007. Recent deformations and hydrothermal fields in the northern part of Paramushir Island. *Moscow University Geology Bulletin* 62 (4), 229–233. https://doi.org/10.3103/S01458752 07040035.
- *Kolodeznikov I.I.* (Ed.), 2017. Seismotectonics of the northeastern sector of the Russian Arctic. Publishing House of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, 135 p. (in Russian) [Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики / Ред. И.И. Колодезников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 135 с.].
- *Kopp M.L.*, 2017. Arcuate Extension Structures in Regional and Global Tectonic Settings: Experience of the Kinematic Analysis. GEOS, Moscow, 96 p. (in Russian) [*Konn М.Л.* Дугообразные структуры растяжения в региональных и глобальных тектонических обстановках: опыт кинематического анализа. М.: ГЕОС, 2017. 96 с.].

L.A. Sim et al.: Results of the tectonic stress study...

- Kopp M.L., Verzhbitsky V.E., Kolesnichenko A.A., Tveritinova T.Yu., Vasil'ev N.Yu., Korchemagin V.A., Makarova N.V., Mostryukov A.O., loffe A.I., 2014. Cenozoic Stress Field in the East of the Russian Plate, Southern and Middle Urals. Methodical, Theoretical and Applied Aspects. GEOS, Moscow, 88 p. (in Russian) [Konn M.Л., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А., Тверитинова Т.Ю., Васильев Н.Ю. Корчемагин В.А., Макарова Н.В., Мострюков А.О., Иоффе А.И. Кайнозойские напряжения востока Русской плиты, Южного и Среднего Урала: методические, теоретические и прикладные аспекты. М.: ГЕОС, 2014. 88 с.].
- Korchemagin V.A., 1984. Geological Structure and Stress Fields in Relation to the Evolution of Endogenous Regimes in Donetsk Region. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). IPE, USSR Acad. Sci., Moscow, 24 p. (in Russian) [Корчемагин В.А. Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. 24 с.].
- Kostenko N.P., 1999. Geomorphology. MSU Publishing House, Moscow, 383 p. (in Russian) [Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1999. 383 с.].
- Коstenko N.P., Bryantseva G.V., 2004. To the problem of structural–geomorphological deciphering in conditions of confined spaces. Bulletin of Moscow State University. Series 4: Geology (4), 34–38 (in Russian) [Костенко Н.П., Брянцева Г.В. К проблеме структурно-геоморфологического дешифрирования в условиях закрытых пространств // Вестник Московского государственного университета. Серия 4: геология. 2004. № 4. С. 34–38].
- *Kropotkin P.N.*, 1977. Stress state of the crust and tectonic faults. In: M.V. Muratov (Ed.), Faults of the Earth's crust. Nauka, Moscow, p. 20–29 (in Russian) [*Кропоткин П.Н.* Напряженное состояние земной коры и тектонические разломы // Разломы земной коры / Ред. М.В. Муратов. М.: Наука, 1977. С. 20–29].
- Lamarche J., Bergerat F., Lewandowski M., Mansy J.L., Świdrowska J., Wieczorek J., 2002. Variscan to Alpine heterogeneous palaeo-stress field above a major Palaeozoic suture in the Carpathian foreland (southeastern Poland). *Tectonophysics* 357 (1–4), 55–80. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00362-1.
- *Leonov Yu.G.*, 1995. Stresses in the lithosphere and intraplate tectonics. *Geotectonics* (6), 3–25 (in Russian) [Леонов Ю.Г. Напряжения в литосфере и внутриплитная тектоника // Геотектоника. 1995. № 6. С. 3–25].
- Levi K.G., Sherman S.I. (Eds.), 2005. Topical Issues of Recent Geodynamics of Central Asia. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 297 p. (in Russian) [Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 297 с.].
- Lobkovsky L.I., Nikishin A.M., Khain V.E., 2004. Modern Problems of Geotectonics and Geodynamics. Nauchny Mir, Moscow, 610 c. (in Russian) [Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 610 c.].
- *Lunina O.V., Gladkov A.S.*, 2007. Late Cenozoic fault pattern and stress fields in the Barguzin rift (Baikal region). *Russian Geology and Geophysics* 48 (7), 598–609. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.06.001.
- *Lunina O.V., Gladkov A.S., Sherman S.I.*, 2007. Variations of stress fields in the Tunka rift of the southwestern Baikal region. *Geotectonics* 41 (3), 231–256. https://doi.org/10.1134/S0016852107030041.
- Marinin A.V., 2013. The tectonophysical researches of the Semisamskaya anticline (North-Western Caucasus fold and thrust belt). *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (4), 461–484 (in Russian) [*Маринин А.В.* Тектонофизические исследования Семисамской антиклинали (Северо-Западный Кавказ) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4. № 4. С. 461–484]. https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-4-0113.
- *Marinin A.V., Sim L.A.*, 2015. The contemporary state of stress and strain at the western pericline of the Greater Caucasus. *Geotectonics* 49 (5), 411–424. https://doi.org/10.1134/S0016852115040068.
- Marinin A.V., Sim L.A., Sycheva N.A., Sychev V.N., 2016. Stress-strain state of the Kirghiz ridge from the data on geological stress indicators. In: Tectonophysics and top problems of Earth sciences. Proceedings of the All-Russia conference. V. 1. IPE RAS, Moscow, p. 152–161 (in Russian) [Маринин А.В., Сим Л.А., Сычева Н.А., Сычев В.Н. Напряженно-деформированное состояние Киргизского хребта по данным изучения геологических стрессиндикаторов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции. М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 152–161].
- Marinin A.V., Tveritinova T.Y., 2016. The structure of the Tuapse shear zone according to the field tectonophysical data. Moscow University Geology Bulletin 71 (2), 151–166. https://doi.org/10.3103/S0145875216020058.
- Markov G.A., 1977. Tectonic Stresses and Rock Pressure in Mines of the Khibiny Massif. Nauka, Leningrad, 213 р. (in Russian) [Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 213 с.].
- Markov G.A., 1980. On the distribution of horizontal tectonic stresses in zones of the crust uplifts. Engineering Geology (1), 20–30 (in Russian) [Марков Г.А. О распространении горизонтальных тектонических напряжений в зонах поднятий земной коры // Инженерная геология. 1980. № 1. С. 20–30].
- *Milanovsky E.E.* (Ed.), 2007. Tectonic Map of Russia, Adjacent Territories and Sea Areas. Scale 1:4000000. MSU, Moscow, 10 sheets (in Russian) [Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий. Масштаб 1:4000000 / Ред. Е.Е. Милановский. М.: МГУ, 2007. 10 листов].
- Milanovsky E.E., Rastsvetaev L.M., Kukhmazov S.U., Birman A.S., Kurdin N.N., Simako V.G., 1989. Modern geodynamics of the Elbrus-Minvody zone of the North Caucasus. In: A.A. Belov, M.A. Satian (Eds.), Geodynamics of the Caucasus. Nedra, Moscow, p. 99–105 (in Russian) [Милановский Е.Е., Расцветаев Л.М., Кухмазов С.У., Бирман А.С., Курдин Н.Н., Симако В.Г. Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской зоны Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа / Ред. А.А. Белов, М.А. Сатиан. М.: Недра, 1989. С. 99–105].

- Molnar P., Tapponnier P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision. Science 189 (4201), 419–426. https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419.
- *Murovskaya A.V.*, 2012. Stress-strain state of the Western Mountainous Crimea in the Oligocene-Holocene according to tectonophysical data. *Geophysical Journal* 34 (2), 109–119 (in Russian) [*Муровская А.В.* Напряженнодеформированное состояние Западного Горного Крыма в олигоцене – голоцене по тектонофизическим данным // *Геофизический журнал.* 2012. Т. 34. № 2. С. 109–119].
- Nikolaev P.N., 1977. Method of statistical analysis of fractures and reconstruction of tectonic stresses. Izvestiya Vuzov. Geology and Exploration (12), 103–115 (in Russian) [Николаев П.Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкция тектонических напряжений // Известия вузов. Геология и разведка. 1977. № 12. С. 103–115].
- Nikolaev P.N., 1992. Method of Tectonodynamic Analysis. Nedra, Moscow, 295 p. (in Russian) [Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.].
- *Osokina D.N.*, 1987. On the hierarchical properties of the tectonic field of stresses and deformations in the Earth's crust. In: A.S. Grigoriev, D.N. Osokina (Eds.), Fields of stresses and deformations in the Earth's crust. Nauka, Moscow, p. 136–151 (in Russian) [*Осокина Д.Н.* Об иерархических свойствах тектонического поля напряжений и деформаций в земной коре // Поля напряжений и деформаций в земной коре // Ред. А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. М.: Наука, 1987. С. 136–151].
- Ostaficzuk S., 1995. Impact of Poland's geological structure on neogeodynamics. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia 34 (3), 79–107.
- Pavlenkova N.I. (Ed.), 2006. Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Research Results of the EUROPROBE Programme. Issue 2. GEOKART, GEOS, Moscow, 735 p. (in Russian) [Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. Вып. 2 / Ред. Н.И. Павленкова. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. 735 с.].
- Petrov V.A., Sim L.A., Nasimov R.M., Shchukin S.I., 2010. Fault tectonics, neotectonic stresses, and hidden uranium mineralization in the area adjacent to the Strel'tsovka Caldera. Geology of Ore Deposits 52 (4), 279–288. https:// doi.org/10.1134/S1075701510040033.
- *Ponomarev V.S.*, 1971. Elastic energy of rocks and seismicity. In: M.A. Sadovsky (Ed.), Experimental seismology. Nauka, Moscow, p. 75–86 (in Russian) [Пономарев В.С. Упругая энергия горных пород и сейсмичность // Экспериментальная сейсмология / Ред. М.А. Садовский. М.: Наука, 1971. С. 75–86].
- *Rastsvetaev L.M.*, 1977. Mountainous Crimea and Northern Black Sea area. In: A.I. Suvorov (Ed.), Faults and horizontal movements of mountain structures. Nauka, Moscow, p. 95–113 (in Russian) [*Pacцветаев Л.М.* Горный Крым и Северное Причерноморье // Разломы и горизонтальные движения горных сооружений / Ред. А.И. Суворов. М.: Наука, 1977. С. 95–113].
- *Rastsvetaev L.M.*, 1982. Structural drawings of fractures and their geomechanical interpretation. *Doklady AN SSSR* 267 (4), 904–909 (in Russian) [*Pacцветаев Л.М.* Структурные рисунки трещиноватости и их геомеханическая интерпретация // Доклады АН СССР. 1982. Т. 267. № 4. С. 904–909].
- *Rebetsky Y.L.*, 2007. Tectonic Stresses and Strength of Rock Massifs. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [*Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.].
- *Rebetsky Y.L.*, 2008. Possible mechanism of horizontal compression stress generation in the Earth's crust. *Doklady Earth Sciences* 423 (2), 1448–1451. https://doi.org/10.1134/S1028334X08090274.
- *Rebetsky Y.L.*, 2015. On the specific state of crustal stresses in intracontinental orogens. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 437–466 (in Russian) [*Ребецкий Ю.Л.* Об особенности напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // *Геодинамика и тектонофизика*. 2015. Т. 6. № 4. С. 437–466]. https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0189.
- Rebetsky Y.L., Sim L.A., Kozyrev A.A., 2017a. Possible mechanism of horizontal overpressure generation of the Khibiny, Lovozero, and Kovdor ore clusters on the Kola Peninsula. *Geology of Ore Deposits* 59 (4), 265–280. https:// doi.org/10.1134/S1075701517040043.
- Rebetsky Y.L., Sim L.A., Marinin A.V., 2017b. From Slickensides to Tectonic Stress. Methods and Algorithms. GEOS, Moscow, 225 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 225 с.].
- Saintot A., Angelier J., 2002. Tectonic paleostress fields and structural evolution of the NW-Caucasus fold-and-thrust belt from Late Cretaceous to Quaternary. *Tectonophysics* 357 (1–4), 1–31. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00360-8.
- San'kov V.A., Parfeevets A.V., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., 2011. Late Cenozoic geodynamics and mechanical coupling of crustal and upper mantle deformations in the Mongolia-Siberia mobile area. *Geotectonics* 45 (5), 378–393. https://doi.org/10.1134/S0016852111050049.
- Seminsky K.Zh., Seminsky Zh.V., 2016. Special Mapping of the Crustal Fault Zones, and Its Possibilities in Studying the Structural Control of Kimberlites in the Alakit-Markha Field, Yakutian Diamond Province. Publishing house of the Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 204 p. (in Russian) [Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алакит-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.].

- Sharov N.V., Malovichko A.A., Shchukin Yu.K. (Eds.), 2007. Earthquakes and Microseismicity in Problems of Modern Geodynamics of the East European Platform. Book 1. Earthquakes. Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk, 381 p. (in Russian) [Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Книга 1. Землетрясения / Ред. Н.В. Шаров, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукин. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 381 с.].
- Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I., 1989. Fields of Crustal Stresses and Geological and Geophysical Methods of Their Studies. Nauka, Novosibirsk, 158 p. (in Russian) [Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.].
- Sidorenko A.V. (Ed.), 1980. Map of faults in the territory of the USSR and neighboring countries. Scale 1:2500000. Ministry of Geology of the USSR, Moscow (in Russian) [Карта разломов территории СССР и сопредельных стран. Масштаб 1:2500000 / Ред. А.В. Сидоренко. М.: Министерство геологии СССР, 1980].
- Sim L.A., 1982. Determination of the regional field from data on local stresses in individual areas. *Izvestia Vuzov. Geologiya i Razvedka (Geology and Exploration)* (4), 35–40 (in Russian) [Сим Л.А. Определение регионального поля по данным о локальных напряжениях на отдельных участках // Известия вузов. Геология и разведка. 1982. № 4. С. 35–40].
- Sim L.A., 1991. The study of tectonic stresses from geological indicators (methods, results, and recommendations). Izvestia Vuzov. Geologiya i Razvedka (Geology and Exploration) (10), 3–22 (in Russian) [Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Известия вузов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22].
- Sim L.A., 1999. Neotectonic stress field of platform structures in the Baltic region. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia 38 (1), 96–101.
- Sim L.A., 2000. The impact of global tectogenesis on the most recent state of stresses of platforms in Europe. In: Yu.G. Leonov, V.N. Strakhov (Eds.), M.V. Gzovsky and development of tectonophysics. Nauka, Moscow, p. 326–350 (in Russian) [Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики / Ред. Ю.Г. Леонов, В.Н. Страхов. М.: Наука, 2000. C. 326–350].
- Sim L.A., 2012. On the relation between the sedimentation volume in the frame basins and the value of erosional drift from the Fennoscandian shield in the Meso-Cenozoic. In: Sedimentary basins and geological prerequisites for prediction of new promising petroleum objects. GEOS, Moscow, p. 392–401 (in Russian) [*Сим Л.А.* О связи объема осадконакопления в бассейнах обрамления с величиной эрозионного сноса с Фенноскандинавского щита в мезокайнозое // Осадочные бассейны и геологические предпосылки прогноза новых объектов, перспективных на нефть и газ. М.: ГЕОС, 2012. С. 392–401].
- Sim L.A., Bogomolov L.M., Bryantseva G.V., Savvichev P.A., 2017. Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island. Geodynamics & Tectonophysics 8 (1), 181–202 (in Russian) [Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 181–202]. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237.
- Sim L.A., Bryantseva G., Karabanov A.K., Levkov E., Aizberg R., 1995. The neotectonic stress of Belorus and the Baltic countries. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia 34 (3), 53–57.
- Sim L.A., Bryantseva G.V., Chekmarev K.V., 2008. On transformation of the structural plan of the northern part of the West-Siberian plate and the Polar Urals in the latest stage. In: Problems of tectonophysics. The 40th anniversary of foundation of Laboratory of Tectonophysics, IPE RAS, by M.V. Gzovsky. IPE RAS, Moscow, p. 301–318 (in Russian) [Сим Л.А., Брянцева Г.В., Чекмарев К.В. О перестройке структурного плана севера Западно-Сибирской плиты и Полярного Урала в новейший этап // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 301–318].
- Sim L.A., Korcemagin V., Frischbutter A., Bankwitz P., 1999. The neotectonic stress field pattern of the East European platform. Zeitschrift fur Geologische Wissenschaften 27 (3/4), 161–182.
- Sim L.A., Marinin A.V., Gareev K.R., Mandelberg A.V., 2016. Modern fault tectonics and the stress-strain state of the Viluisk syneclise. Prediction of sites with increased permeability. In: Tectonophysics and top problems of Earth sciences. Proceedings of the All-Russia conference. V. 1. IPE RAS, Moscow, p. 264–269 (in Russian) [Сим Л.А., Маринин А.В., Гареев К.Р., Мандельберг А.В. Новейшая разломная тектоника и напряженно–деформированное состояние Вилюйской синеклизы. Прогноз участков с повышенной проницаемостью // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской конференции. М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 264–269].
- Sim L.A., Sergeev A.A., 1996. Eine strukturell-geomorphologische Methode zur Analyse aktiver Bruche mit dem Ziel der bestimmung neotectonischer Spannungen in Tafelgebieten. Zeitschrift fur Geologische Wissenschaften 24, 369–376.
- Sim L.A., Sycheva N.A., Sychev V.N., Marinin A.V., 2014. The pattern of the paleo-and present-day stresses of Northern Tien Shan. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 50 (3), 378–392. https://doi.org/10.1134/S1069351314030100.
- Sim L.A., Zhirov D.V., Marinin A.V., 2011. Stress and strain reconstruction for the eastern segment of the Baltic shield. Geodynamics & Tectonophysics 2 (3), 219–243 (in Russian) [Сим Л.А., Жиров Д.В., Маринин А.В. Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 3. С. 219–243]. https://doi.org/10.5800/GT-2011-2-3-0044.
- *Umurzakov R.A.*, 2009. Stress fields and the formation mechanism of earthquake foci in mountain regions of the Tien Shan from geostructural data. In: Tectonophysics and top problems of Earth sciences. Proceedings of the All-

Russia conference. IPE RAS, Moscow, p. 408–414 (in Russian) [Умурзаков Р.А. Поля напряжений и механизм формирования очагов землетрясений в некоторых горных областях Тянь-Шаня по геолого-структурным данным // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов всероссийской кон-ференции. М.: ИФЗ РАН, 2009. С. 408–414].

- Volokh N.P., Sashurin A.D., Lipin Ya.I., 1972. Investigations of residual stresses in strong rocks. In: N.V. Melnikov (Ed.), Modern problems of rock mechanics. Nauka, Leningrad, p. 186–189 (in Russian) [Волох Н.П., Сашурин А.Д., Липин Я.И. Исследования остаточных напряжений в крепких горных породах // Современные проблемы механики горных пород / Ред. Н.В. Мельников. Л.: Наука, 1972. С. 186–189].
- *Vvedenskaya A.V.*, 1969. Studies of Stresses and Fractures in Earthquake Foci by the Theory of Dislocations. Nauka, Moscow, 136 p. (in Russian) [*Введенская А.В.* Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.].
- Yurchenko O.S., Sim L.A., 2008. Shear tectonics of Maksimkinskaya and Avrigolskaya areas of the Alexandrovsky dome. In: Tectonophysics and top problems of Earth sciences. Proceedings of the All-Russia conference. Proceedings of the All-Russia conference. V. 1. IPE RAS, Moscow, p. 199–201 (in Russian) [Юрченко О.С., Сим Л.А. Сдвиговая тектоника Максимкинской и Авригольской площадей Александровского свода // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов Всероссийской конференции. М.: ИФЗ РАН, 2008. Т. 1. С. 199–201].
- Zoback M.L., 1992. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 97 (B8), 11703–11728. https://doi.org/10.1029/92JB00132.
- Zyatkova L.K., 1979. Structural Geomorphology of Western Siberia. Nauka, Novosibirsk, 200 p. (in Russian) [Зятькова Л.К. Структурная геоморфология Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1979. 200 с.].



Лидия Андреевна Сим, докт. геол.-мин. наук, в.н.с. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия

🖂 e-mail: sim@ifz.ru

Lidia A. Sim, Doctor of Geology and Mineralogy, Lead Researcher O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia



Антон Витальевич Маринин, канд. геол.-мин. наук, с.н.с. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия

e-mail: marinin@yandex.ru

Anton V. Marinin, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia



Галина Владимировна Брянцева, канд. геол.-мин. наук, доцент Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет 119991, Москва, Ленинские Горы, 1, Россия

e-mail: bryan.bryan@yandex.ru

Galina V. Bryantseva, Candidate of Geology and Mineralogy, Assistant Professor M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia



Никита Александрович Гордеев, инженер Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия

Nikita A. Gordeev, Engineer O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia