



## NEOTECTONICS AND TECTONIC STRESSES OF THE SAKHALIN ISLAND

L. A. Sim<sup>1</sup>, L. M. Bogomolov<sup>2</sup>, G. V. Bryantseva<sup>3</sup>, P. A. Savvichev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>3</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty, Moscow, Russia

**Abstract:** The paper describes the neotectonics of the Sakhalin Island and analyzes the latest and recent tectonic stresses in the study area in order to establish their differences in the Amur and Okhotsk microplates, which boundary is confined to the Tym-Poronaik fault, the largest NS-striking fault in the Central Sakhalin (Fig. 1). Our map of the structural geomorphological features of the study area (Fig. 2) shows three longitudinal zones: the western and eastern uplifts, and the Central Sakhalin basin between the uplifts. In the Southern Sakhalin, neotectonic stresses were studied by a combination of tectonophysical methods and the method of structural geology (Figures 3 to 6, and Table). Our study shows that the regional axes of maximum and minimum compressive principal normal stresses are primarily of the subhorizontal orientations (Fig. 5, *Д*). In the Northern and Central Sakhalin, neotectonic stresses were reconstructed by the structural geomorphology method. The compression axes are oriented sublatitudinally, with the NE-trending strike in the Northern Sakhalin (Fig. 7, *А*), and the extension axes are oriented submeridionally; in the Northern Sakhalin, respectively, they are oriented in the NW direction. The results of our study of neotectonic stresses were used to construct a map of recent geodynamics of Sakhalin (Fig. 7, *В*), which shows zones differing in the geodynamic settings of the most recent faulting. According to the analysis of the recent tectonic stress with respect to the earthquake focal mechanisms in the period from 1978 to 2015 (Fig. 8), recent stresses dominating in Sakhalin have mainly the sublatitudinal low-angle orientations of the deviatoric compression axis. The submeridional low-angle orientations of the deviatoric extension axes are observed in the Northern Sakhalin and partly in the north of the Southern Sakhalin (see Fig. 8). The high-angle axes of deviatoric extension are typical of the western and central parts of the Southern Sakhalin, and such extension leads to horizontal compression and reverse faulting. In some areas of the recent stress field, the deviatoric axes of compression and extension have unstable orientations. The latitudinal boundaries of such areas are nearly coincident with the boundaries of the zones that differ in the geodynamic settings of the most recent faulting, which means that these areas and zones are reliably identified. The relative inhomogeneity of the neotectonic and recent stress fields in the Southern Sakhalin does not give grounds to distinguish differences in the state of crustal stresses in the areas located on the sides of the Southern Sakhalin fault. As a consequence, a boundary between the Amur and the Okhotsk Plate in the South Sakhalin cannot be drawn along this fault. It is most likely that this boundary coincides with the Western-Sakhalin fault in the southern areas of the study region. Our data on the Central and Northern Sakhalin does not contradict with the conclusion in [Savostin *et al.*, 1982] concerning this boundary.

**Key words:** neotectonic structures; tectonic stress; strike-slip faults; reverse faults; seismicity; Sakhalin

### RESEARCH ARTICLE

Recommended by S.V. Rasskazov (Guest Editor)

Received: February 26, 2016

Revised: August 19, 2016

Accepted: December 15, 2016

**For citation:** 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. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0237.

**Для цитирования:** 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. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0237.

# НЕОТЕКТОНИКА И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОСТРОВА САХАЛИН

Л. А. Сим<sup>1</sup>, Л. М. Богомолов<sup>2</sup>, Г. В. Брянцева<sup>3</sup>, П. А. Саввичев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

**Аннотация:** Охарактеризована неотектоника, новейшие и современные тектонические напряжения Сахалина для установления их различия в Амурской и Охотской микроплитах, граница между которыми приурочена к меридиональному крупнейшему Центрально-Сахалинскому (Тынь-Поронайскому) разлому (рис. 1). Составлена структурно-геоморфологическая карта (рис. 2), на которой выделены три продольные зоны – западная и восточная зоны поднятий, разделенные Центрально-Сахалинской протяженной впадиной. Неотектонические напряжения, изученные комплексом тектонофизических и структурных методов на Южном Сахалине (рис. 3–6; табл. 1), показали, что оси максимальных и минимальных сжимающих главных нормальных напряжений регионального уровня ориентированы преимущественно субгоризонтально (рис. 5, Д). На Северном и Центральном Сахалине неотектонические напряжения восстановлены структурно-геоморфологическим методом. Оси сжатия ориентированы субширотно, с тенденцией северо-восточного простираения на Северном Сахалине (рис. 7, А), а оси растяжения – субмеридионально; на Северном Сахалине, соответственно, они ориентированы в северо-западном направлении. В результате изучения неотектонических напряжений составлена схема новейшей геодинамики Сахалина (рис. 7, Б). На ней показано районирование областей с разной геодинамической обстановкой формирования разломов в новейший этап. Анализ современных тектонических напряжений по механизмам очагов землетрясений, характеризующих события 1978–2015 гг. (рис. 8), показал, что на Сахалине доминируют современные напряжения с субширотной пологой ориентировкой оси девиаторного сжатия и субмеридиональной, также пологой, ориентировкой оси девиаторного растяжения на севере острова и частично на севере Южного Сахалина (рис. 8). Запад и центр Южного Сахалина, включая восточную часть Татарского пролива, характеризуются крутыми осями девиаторного растяжения, обеспечивающего геодинамический режим горизонтального сжатия и развитие взбросовых структур. Широтные границы областей с неустойчивыми ориентировками девиаторных осей сжатия и растяжения современного поля напряжений близки к границам областей с разной геодинамической обстановкой формирования разломов в новейший этап, что подтверждает объективность выделения этих областей. Выявленная относительная однородность неотектонического и современного полей напряжений Южного Сахалина 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 Охотской плитами на Южном Сахалине. Наиболее вероятным представляется то, что на юге района она совпадает с Западно-Сахалинским разломом, а на Центральном и на Северном Сахалине материалы, полученные проведенными исследованиями, не противоречат границе, проведенной Л.А. Савостиным [Savostin et al., 1982].

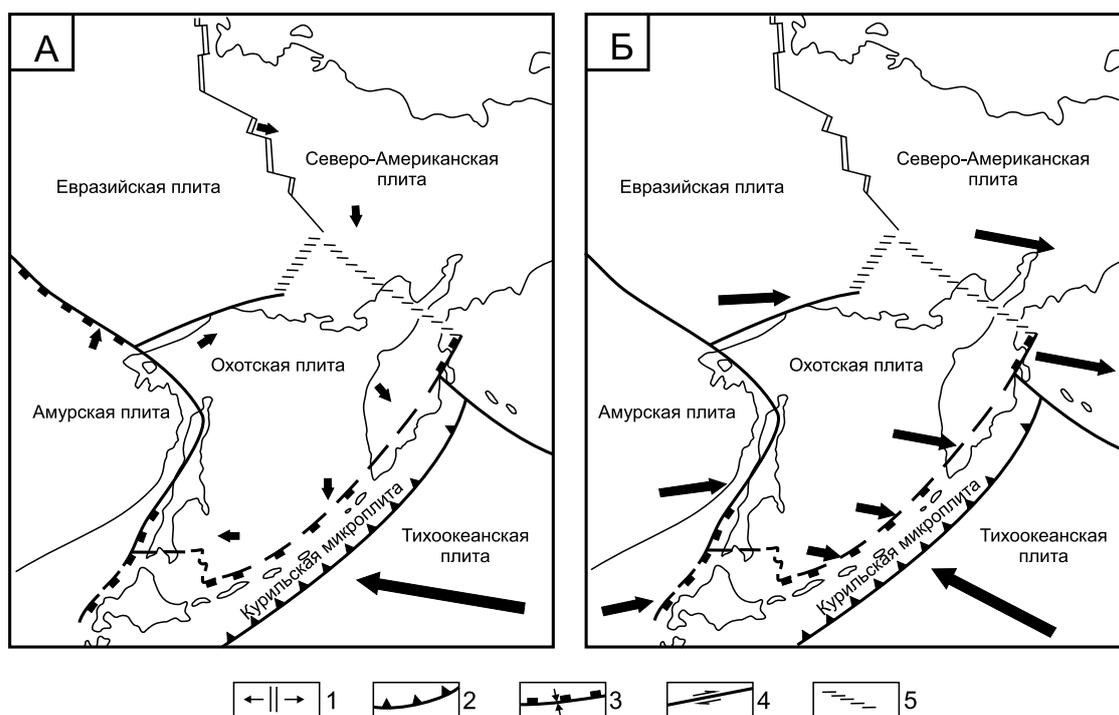
**Ключевые слова:** неотектонические структуры; тектонические напряжения; сдвиги; взбросы; сейсмичность; Сахалин

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Остров Сахалин относится к активному региону Северо-Восточной Азии, в пределах которого проходит граница между крупнейшими литосферными плитами Земли: Евразийской, Северо-Американской и Тихоокеанской. Вдоль конвергентных границ указанных плит существует широкая пограничная зона, представленная Амурской, Охотской и Курильской микроплитами [Savostin et al., 1982; Seno, Sakurai, 1996].

Граница между двумя наиболее крупными микроплитами – Амурской и Охотской – приурочена к

меридиональному крупнейшему Центрально-Сахалинскому (Тынь-Поронайскому) разлому [Imaev et al., 2000; Ismail-Zadeh et al., 2013]. В работе [Seno, Sakurai, 1996] показаны два варианта границы между этими микроплитами, которые выделили разные авторы. Л.А. Савостин и др. [Savostin et al., 1982] проводил обсуждаемую границу по Татарскому проливу до середины Центрального Сахалина, далее она сечет эту часть Сахалина в СВ направлении и на севере Сахалина, сделав дугу, совпадающую с Северо-Сахалинским разломом в центральной части п-ова Шмидта, уходит на СЗ в континентальную часть Азии (рис. 1). В работе [Gatinsky, Rund-



**Рис. 1.** Кинематика современных движений плит Охотоморского региона: А – по отношению к неподвижной Евразии; Б – по отношению к Курильской островодужной плите.

Стрелками в масштабе показаны направление и величина относительных движений. Границы плит: 1 – наращивания; 2 – поглощения; 3 – сжатия; 4 – скольжения; 5 – неуставленного типа [Savostin et al., 1982].

**Fig. 1.** Kinematics of the recent plate movements in the Okhotsk Sea region: А – relative to Eurasia (not moving); Б – relative to the Kuril island-arc plate.

Arrows show the directions and values of relative movements. Plate boundaries: 1 – accretion; 2 – absorption; 3 – compression; 4 – slip; 5 – unknown type [Savostin et al., 1982].

quist, 2004] между Амурским и Охотским блоками выделяется Японско-Корейский блок, который и должен граничить с Охотским блоком.

Подобное разночтение в проведении границы между Амурской и Охотской микроплитами обусловило формулировку цели исследований. Для более объективного проведения границы между указанными микроплитами необходимо было исследовать неотектоническое и современное напряженное состояние о. Сахалин.

Изучению тектонических напряжений и деформаций этого района посвящены работы В.Н. Рождественского [Rozhdestvensky, 1987, 1997], В.В. Голозубова и др. [Golozubov et al., 2012]. Эти авторы широко использовали теорию эллипсоида деформаций, но «наблюдаются аномальные структуры, трудно объяснимые с точки зрения этой теории» [Rozhdestvensky, 1997, с. 96]. Возможно, эти трудности были связаны с двумерностью эллипсоида деформаций, тогда как О.И. Гущенко [Gushchenko, 1979] рассчитал все возможные парагенезы плоскостей с разными кинематическими типами перемещений при заданных направлениях осей главных нор-

мальных напряжений. Эти расчеты позволяют совместно анализировать переходные кинематические типы разрывных нарушений (плоскостей с бороздами скольжения) – сдвиго-взбросов, взбросо-сдвигов и т.д., что снимает трудности интерпретации результатов документирования частных смещений по плоскостям с бороздами скольжения. Кроме этого, сдвиги, картированные на Сахалине [Rozhdestvensky, 1969, 1987, 1997; Golozubov et al., 2012] показали, что в достаточно слабообнаженных районах Северного и Центрального Сахалина можно применить структурно-геоморфологический метод (СГ) [Sim, 1991, 2000], позволяющий характеризовать по всей исследуемой площади сдвиговые тектонические напряжения. Определение и анализ механизмов очагов землетрясений Сахалина проведены в значительном числе работ, их обобщение опубликовано в работах [Konovalov et al., 2014; Tataurova, 2015; и др.]. Нами выполнен анализ механизмов очагов землетрясений по каталогам, которые частично перекрываются с каталогами, использованными в указанных работах.

Согласно [Golozubov et al., 2012], 1.8 млн лет назад в результате изменения направления перемещения Евразийской плиты появилась Западно-Сахалинская зона локальной инверсии, сопровождающаяся изменением знака сдвигового смещения по Центрально-Сахалинскому разлому на взбросо-надвиговое; из этого следует, что граница Евразийской плиты совпадает с Центрально-Сахалинским разломом. При этом направления движений Охотской и Амурской плит отличаются, так же как они отличаются на рис. 1, что должно обусловить в них разное напряженное состояние.

Таким образом, целью исследований являлась характеристика неотектоники и поля неотектонических и современных напряжений Сахалина для установления их различия на Амурской и Охотской плитах и подтверждения границы между ними, ассоциируемой с зоной Центрально-Сахалинского разлома.

С этой целью для изучения новейшей тектоники в пределах Сахалина авторами проведены региональные структурно-геоморфологические исследования по методике, разработанной Н.П. Костенко [Korchuganova et al., 2001], и выполнена реконструкция неотектонических напряжений с использованием комплекса методов, развитых в известных работах [Gzovsky, 1975; Gushchenko, 1979; Sim, 1991, 2000], а также современных напряжений катаклическим методом [Rebetsky, 1999]. В результате исследований, включающих в том числе анализ литературных данных по глубинному строению земной коры и литосферы обсуждаемой территории, новейшей тектоники и кинематическим типам разломов на плиоцен-четвертичном этапе развития района, составлена структурно-геоморфологическая схема о. Сахалин, показано разнообразие локальных стресс-состояний в различных объемах горных пород, восстановлено региональное поле неотектонических напряжений о. Сахалин, а также составлены схемы современного напряженного состояния по механизмам очагов землетрясений. Проведенная работа способствовала достижению поставленной цели, а именно: доказана неправомерность выделения границы между Амурской и Охотской микроплитами на Южном Сахалине по Центрально-Сахалинскому разлому.

## 2. НОВЕЙШАЯ ТЕКТОНИКА САХАЛИНА

По мнению большинства геологов, новейший этап развития данного региона начинается с плиоцен-четвертичного времени [Grachev, 1998; Voeikova et al., 2007]. Собственно орогенные процессы начались после завершения сахалинской фазы складчатости [Kuchai, 1987] или последней фазы сжатия

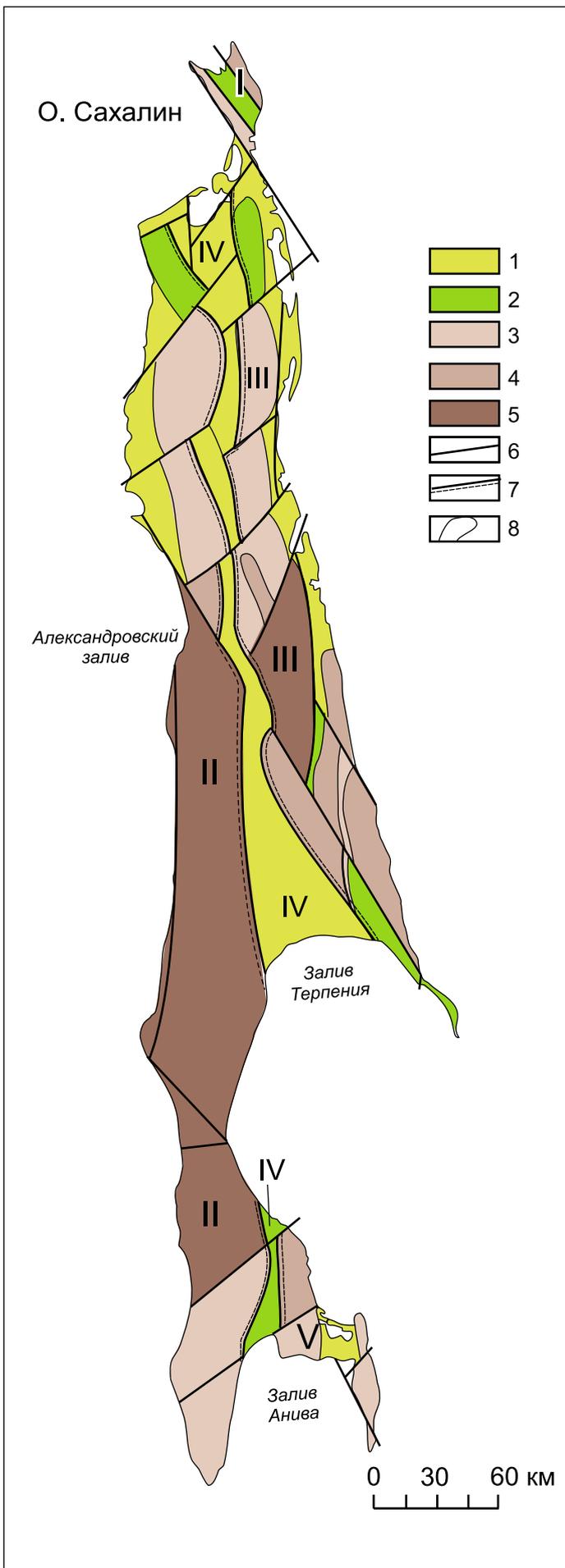
[Grannik, 2008, 2011], что приводит к более молодому возрасту начала новейшего этапа в антропогене. При выделении новейших разломов Сахалина учитывались работы [Bulgakov et al., 2002; Voeikova et al., 2007; Golozubov et al., 2012; Rogozhin, 1996, 2012; Rozhdestvensky, 1969, 1987, 1997; Kharakhinov, 2010].

В современном рельефе Сахалина отчетливо выделяются три зоны: Западная, Восточная и Центральная, имеющие субмеридиональное простирание. В целом, в абсолютных высотах современного рельефа прослеживается различие в строении структур с севера на юг, что дало основание предшественникам [Voeikova et al., 2007] произвести поперечное районирование новейших структур и с севера на юг выделить сегменты: Шмидтовский, Северо-, Центрально- и Южно-Сахалинский. В выделенных нами продольных зонах откартированы отдельные крупные поднятия, ограниченные разломами (рис. 2).

*Шмидтовское поднятие* (I) на севере Сахалина образовано вулканогенно-кремнистыми верхнемеловыми отложениями с гипербазитами. Суммарные конэрозионные поднятия здесь достигают 1000 м. Поднятие ограничено разрывными нарушениями СЗ простирания.

*Западно-Сахалинское поднятие* (II) протягивается через весь остров и имеет сложное строение. Оно отделяется от Центрально-Сахалинской впадины на Северном Сахалине частично с предполагаемым под четвертичными отложениями Восточно-Энгицпальским разломом [Rozhdestvensky, 1997]. На Южном Сахалине поднятие ограничено Центрально-Сахалинским разломом (рис. 2). Оно сложено мощными преимущественно терригенными толщами верхнего мела, палеогена и неогена. В северных районах острова в пределах Северо-Сахалинской равнины суммарные конэрозионные поднятия редко превышают 200 м. В этой кайнозойской впадине с мощной толщей (до 8 км) осадочных пород в настоящее время наблюдается рост частных поднятий с высотами, достигающими 500 м. Они имеют субмеридиональное простирание и осложнены разрывами СВ простирания незначительной протяженности. К югу от разлома СЗ простирания, имеющего значительную протяженность и совпадающего в ЮВ части с разломами, выделенными ранее [Rozhdestvensky, 1997], а также с Набильским разломом [Kharakhinov et al., 1984], суммарные конэрозионные поднятия достигают более 1000 м, а на юге Южно-Камышового хребта снижаются до 500 м.

*Восточно-Сахалинское поднятие* (III) протягивается с севера на юг от п-ва Шмидта до залива Терпения и относится к наиболее древним поднятиям, которые развивались с позднего мезозоя [Rozhdestvensky, 1987; Voeikova et al., 2007]. На севере, в



**Рис. 2.** Структурно-геоморфологическая карта о-ва Сахалин.

1–5 – суммарные конэрозионные поднятия в метрах: 1 – менее 100, 2 – 100–200, 3 – 200–500, 4 – 500–1000, 5 – более 1000; 6 – разломы, выделенные по геоморфологическим данным; 7 – границы структур 1-го порядка; 8 – границы поднятий и впадин. Цифрами на карте обозначены поднятия: I – Шмидтовское, II – Западно-Сахалинское, III – Восточно-Сахалинское, V – Сусунайское и IV – Центрально-Сахалинская впадина.

**Fig. 2.** The map of the Sakhalin Island, showing the structural and geomorphological features.

1–5 – summary syn-erosional uplifts: 1 – less than 100 m, 2 – 100–200 m, 3 – 200–500 m, 4 – 500–1000 m, 5 – more than 1000 m; 6 – faults identified from the geomorphological data; 7 – boundaries of the first-order structures; 8 – boundaries of uplifts and depressions. Uplifts: I – Schmidt, II – Western Sakhalin, III – Eastern Sakhalin, V – Susunai. IV – Central Sakhalin depression.

пределах Северо-Сахалинской равнины его структура аналогична Западно-Сахалинскому, южнее поднятие расширяется, достигая высот более 1000 м, а затем резко сужается в районе п-ва Терпения. Поднятие сложено вулканогенно-осадочными островодужными образованиями позднемелового-палеогенового возраста.

*Центрально-Сахалинская впадина (IV)* протягивается узкой полосой с севера на юг, отделяя Западно-Сахалинское поднятие от Восточно-Сахалинского, и имеет высоты, редко превышающие 200 м. Южнее разлома СЗ простирания западная ее граница становится субпараллельной этому разлому, что приводит к значительному ее расширению в районе залива Терпения. В пределах данного участка картируется локальное поднятие с высотами более 500 м. На юге острова можно проследить продолжение этой впадины, выполненной четвертичными отложениями, которая разрабатывается рекой Сусуя, отделяя Западно-Сахалинское поднятие от Сусунайского. Северная часть впадины соответствует Тымь-Поронайской, а на Южном Сахалине – Аниво-Сусунайской и Центрально-Анивской мегавпадинам [Voeikova et al., 2007].

*Сусунайское поднятие (V)* представляет собой два хребта-поднятия: Сусунайское, сложенное породами мела и палеогена, и Тонино-Анивское, образованное породами мела и юры, разделенные Тунайчинской впадиной. Эти структуры имеют субмеридиональное простирание, западная граница поднятия с Центрально-Сахалинской впадиной проходит по меридиональному разлому, практически наследующему Мерейскую шовную зону [Zharov, 2004]. Поверхность поднятия Сусунайского хребта находится на максимальных для Сахалина, выше 1000 м, высотах над уровнем моря. Высота поверхности впадины не превышает 200 м.

### 3. НОВЕЙШИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ САХАЛИНА

Наиболее детально комплексом полевых структурных и тектонофизических методов изучены тектонические напряжения Южного Сахалина (рис. 3).

На Северном и Центральном Сахалине реконструкция сдвиговых тектонических напряжений произведена структурно-геоморфологическим методом.

#### 3.1. Локальные стресс-состояния (ЛСС) и новейшие разломы Южного Сахалина

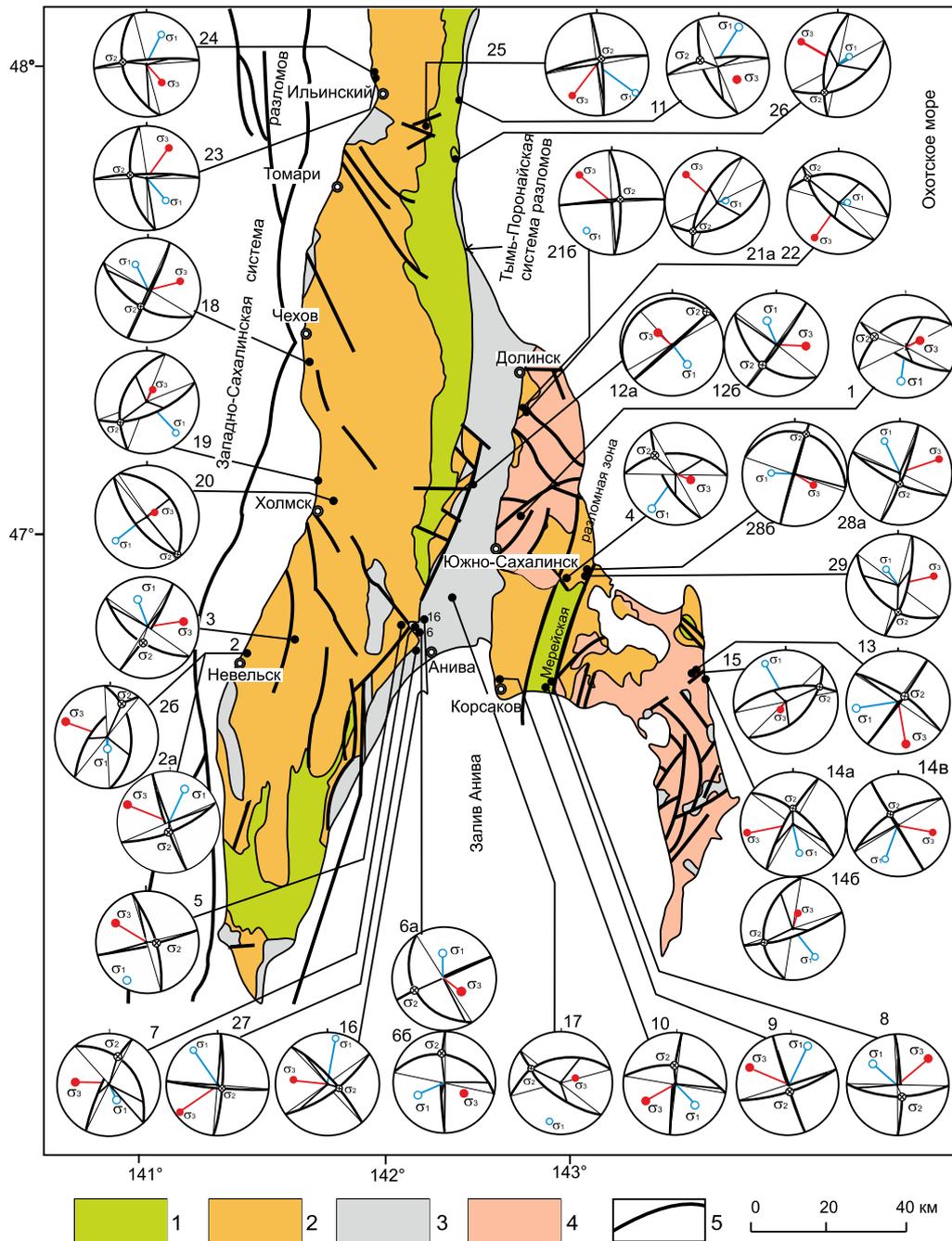
Неотектонические напряжения на Южном Сахалине восстанавливались методом выделения соприкасающихся сколовых трещин [Gzovsky, 1975], кинематическим методом [Gushchenko, 1979] и методом

анализа поясного распределения трещин в зонах динамического влияния разломов [Danilovich, 1961].

На рис. 4, А, Б, показаны результаты анализа трещиноватости в антропогенных склоновых делювиальных отложениях на левобережье р. Лютога (таблица, объем 16).

По трещиноватости выделен пояс трещин  $P_1P_2$  и его ось Р. Обнажение находится в лежачем крыле Центрально-Сахалинского разлома, простирание которого взято по структурно-геоморфологической карте (см. рис. 2). При неизвестной ориентировке плоскости сместителя разлома, соединив точки его простирания на внешнем круге стереограммы  $R_1R_2$  с точкой полюса пояса трещин Р, восстанавливаем плоскость разлома  $R_1PR_2$  с полюсом R. Точка  $S_1$  – пересечение плоскости разлома с поясом  $P_1P_2$  – является точкой выхода линии перемещения по плоскости разлома на верхнюю полусферу. Соединив ее с центром стереограммы, получаем искомую линию перемещения. Так как разлом является правым сдвиго-взбросом [Kozhurin, 2013], а также по выраженности в рельефе с поднятым западным крылом, линии перемещения присваивается знак правого взбросо-сдвига; доминирование сдвиговой составляющей над взбросовой здесь можно объяснить СВ простиранием разлома в этой части; взбросовая компонента перемещений преобладает только при меридиональном простирании разлома в эллипсоиде деформаций с широтным укорочением и меридиональным удлинением [Rozhdestvensky, 1997; Golozubov et al., 2012]. В.С. Рождественский при изучении Тымь-Поронайского разлома установил, что при рассмотрении его на всем протяжении обнаруживается неоднотипное строение [Rozhdestvensky, 1997, с. 105], т.е. реконструированное нами взбросо-сдвиговое смещение в объеме № 16 не противоречит его наблюдениям на северном продолжении Центрально-Сахалинского разлома.

На стереограмму нанесены оси сжатия ( $\sigma_3^{06}$ ) и растяжения ( $\sigma_1^{06}$ ) общего поля напряжений Южного Сахалина. В этом общем поле, соединив полюс разлома R с осями  $\sigma_3^{06}$  и  $\sigma_1^{06}$  дугами больших кругов, получим весь интервал возможных перемещений по разлому: от тчк.  $S_1$  при одноосном растяжении до тчк.  $S_2$  при одноосном сжатии. На поясе трещин выделены два максимума плотности трещин, оконтуренные изолинией 8 % – I и II. Центрам этих максимумов соответствуют трещины I-I и II-II (рис. 4, Б). Ось пояса Р соответствует промежуточной оси  $\sigma_2$  [Danilovich, 1961], по биссектрисам углов между трещинами I-I и II-II определяются положения осей сжатия  $\sigma_3$  и растяжения  $\sigma_1$  по методике М.В. Гзовского. Ось сжатия попадает в створ тупого угла, что противоречит методу.



**Рис. 3.** Схема геологического строения (по [Golozubov et al., 2012], упрощено) и локальных тектонических напряжений Южного Сахалина.

1–4 – комплексы разновозрастных образований: 1 – альбские и верхнемеловые терригенные, частью туфово-терригенные, 2 – палеоцен-миоценовые терригенные, реже – вулканогенные, 3 – миоцен-четвертичные терригенные, 4 – меловые и палеоцен-эоценовые аккреционные комплексы Сусунайского, Тонино-Анивского террейнов; 5 – разломы. На стереограммах показаны оси главных нормальных ( $\sigma_1$  – минимальных,  $\sigma_2$  – промежуточных,  $\sigma_3$  – максимальных сжимающих) напряжений и плоскости действия максимальных касательных напряжений с векторами перемещения отсутствующего крыла (сетка Вульфа, верхняя полу-сфера). Описание пунктов 1–11, где были определены направления локальных напряжений, приведено в таблице, нумерация соответствует первому столбцу.

**Fig. 3.** The scheme of the Southern Sakhalin showing the geological structure (simplified from [Golozubov et al., 2012]) and the local tectonic stresses.

1–4 – heterochronous rock complexes: 1 – Albian and Upper Cretaceous terrigenous, partly tuff-terrigenous, 2 – Paleocene-Miocene terrigenous, rare volcanic, 3 – Miocene-Quaternary terrigenous, 4 – Cretaceous and Paleocene-Eocene accretionary rock complexes of the Susunai and Tonino-Aniva terranes; 5 – faults. The stereograms show the axes of the main normal ( $\sigma_1$  – minimum,  $\sigma_2$  – intermediate,  $\sigma_3$  – maximum compressive) stresses, the planes of maximum tangential stresses and the displacement vectors of the lacking wing (Wulff net, upper hemisphere). Sites 1 to 11, wherein the directions of local stresses were determined, are described in Table (the numbers correspond to those in the first column of Table).

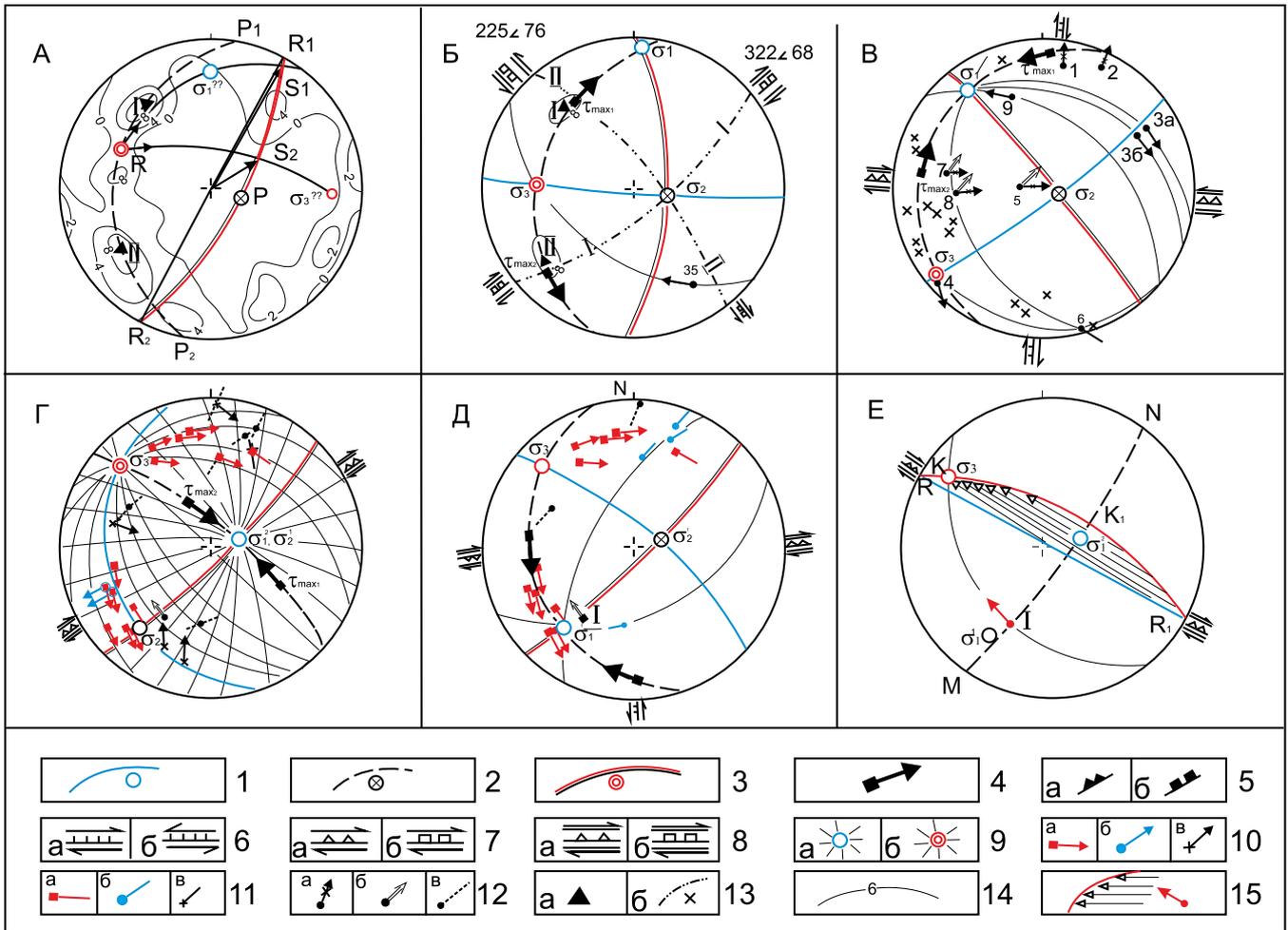


Рис. 4. Стереогаммы локальных стресс-состояний Южного Сахалина.

1–3 – оси локальных стресс-состояний (ЛСС) и плоскости их действия: 1 – минимальных ( $\sigma_1$ ), 2 – промежуточных ( $\sigma_2$ ), 3 – максимальных ( $\sigma_3$ ) сжимающих главных нормальных напряжений; 4 – полюсы плоскостей действия максимальных касательных напряжений ( $\tau_{\max}$ ) и векторы перемещений по ним; 5–8 – простирания плоскостей  $\tau_{\max}$  и их кинематические типы: 5а – взбросы, 5б – сбросы, 6а – правые, 6б – левые сдвиги, 7а – сдвиго-взбросы, 7б – сдвиго-сбросы, 8а – взбросо-сдвиги, 8б – сбросо-сдвиги; 9 – дуги больших кругов, расходящихся: а – от оси растяжения, б – от оси сжатия; 10–13 – линии и векторы перемещений на зеркалах скольжения, сформированные при: 10а – одноосном сжатии, 10б – одноосном растяжении, 10в – в трехосном напряженном состоянии, 11 – то же, но с неустановленным знаком смещения, 12 – линии перемещений: а – с установленной частичной компонентой перемещений (вертикальной или горизонтальной), б – прогнозируемые, в – противоречащие реконструированному ЛСС, 13 – трещины: а – полюсы максимумов сколовых трещин, б – полюсы и плоскость отдельных сколовых сопряженных трещин или систем; 14 – изолинии плотности трещин; 15 – полюс и плоскость разлома и линии перемещения висячего крыла на ней. А, Б – объем 16, левобережье р. Лютога (50 замеров): А – плотность полюсов трещин и пояс трещиноватости, Б – оси главных нормальных напряжений; В – объем 27, правый берег р. Веселый (23 замера трещин, 9 – с бороздами скольжения); Г, Д, Е – Южно-Соколовский карьер: Г – молодое поле, Д – древнее поле ЛСС в висячем крыле разлома, Е – плоскость разлома и вектор перемещения по нему. Сетка Вульфа-Гущенко, верхняя полусфера.

Fig. 4. Stereograms of the local stress state (LSS) in the Southern Sakhalin.

1–3 – LSS axes and planes: 1 – minimal ( $\sigma_1$ ), 2 – intermediate ( $\sigma_2$ ), 3 – maximal ( $\sigma_3$ ) compression axes of the main normal stresses; 4 – poles of the planes of maximum tangential stresses ( $\tau_{\max}$ ) and displacement vectors; 5–8 – strikes of planes  $\tau_{\max}$  and kinematic types of faults: 5a – reverse faults, 5b – normal faults, 6a – right-lateral, 6b – left-lateral, 7a – reverse faults with strike-slip component, 7b – normal faults with reverse component, 8a – strike-slip faults with reverse component, 8b – strike-slip faults with normal component; 9 – arcs of large circles: a – from the extension axis, b – from the compression axis; 10–13 – displacement lines and vectors on slickensides, which occurred due to: 10a – uniaxial compression, 10b – uniaxial extension, 10v – triaxial stress state, 11 – the same, but with the unknown sign of displacement, 12 – displacement lines: a – detected partial (vertical or horizontal) component of displacements, б – predicted, в – contrary to the reconstructed LSS, 13 – fractures: а – poles of maximums of shear fractures, б – poles and planes of conjugated shear fractures / systems; 14 – isolines of the density of fractures; 15 – poles and fault planes and displacement lines of the hanging wall. А, В – volume 16, the left bank of the Lyutoga river (50 measurements): А – the density of fractures poles and the fracturing belt, В – axes of the main normal stresses; В – volume 27, the right bank of the Vesely river (23 measured fractures, including 9 with sliding grooves); Г, Д, Е – South Sokolovsky quarry: Г – recent field, Д – ancient field of LSS in the hanging wall of the fault, Е – planes of fractures and displacement vectors. Wulff-Gushchenko net, upper hemisphere.

## Ориентировка тектонических напряжений Южного Сахалина

## Orientations of tectonic stresses in the Southern Sakhalin

№ объемов	Точка набл.	Район	$\sigma_1$ , аз. и угол падения	$\sigma_2$ , аз. и угол падения	$\sigma_3$ , аз. и угол падения	$\tau_{\max}$ , аз. и угол падения, тип	$\tau_{\max}$ , аз. и угол падения, тип
1	1, 2	Карьер Буря 47°01'27" N, 142°48'13" E	6∠20	106∠25	243∠56	27∠68 СЛ	148∠35 СП
2a	3, 4	г. Невельск, сев. окраина и Южный осушенный бенч, 46°39'29" N, 141°50' 57" E, древнее поле	202∠20	356∠67	110∠9	68∠82 ВЛ	335∠69 ВП
2б	3, 4	г. Невельск, сев. окраина и Южный осушенный бенч, молодое поле	356∠67	202∠20	108∠10	126∠57 ПВ	266∠38 ЛВ
3	5	500 м восточнее перевала Невельский, 46°44'40" N, 142°07'01" E	162∠30	21∠55	264∠18	302∠80 ВП	38∠56 ВЛ
4	7	Карьер Лиственничный, 46°51'8" N, 142°59'30" E	34∠10	130∠32	288∠54	60∠63 СЛ	180∠44 СП
5	8	Река Лютога, у моста выше дер. Огоньки	18∠10	271∠68	112∠20	345∠83 СП	252∠70 Л
6a	9, 10	Центр Петропавловского карьера, 46°46' 48" N, 142°28'26" E молодое поле	176∠36	65∠28	306∠40	152∠88 ПС	57∠28 СЛ
6б	9, 10	Петропавловский карьер, древнее поле	65∠30	176∠32	302∠43	92∠82 СЛ	192∠34 СП
7	11	500 м от слагабаума на въезде в Петропавловский карьер на восток	330∠50	196∠30	90∠20	118∠74 ПВ	229∠35 ВЛ
8	12	Гора Юнона, верхний уступ карьера, ЮВ стенка 46°37'02" N, 142°58'08" E	132∠23	343∠65	227∠10	268∠80 ВП	2∠66 Л
9	13	Гора Юнона, нижний уступ карьера, ЮЗ стенка	208∠10	345∠75	118∠10	76∠89 ВЛ	344∠76 П
10	14	Гор. Корсаков, скальная стенка 150 м. от ул. Вокзальная	314∠30	176∠52	58∠30	94∠84 ВП	188∠54 ВЛ
11	15	Бухта Тихая, 48°00'10" N, 142°31'15" E	210∠5	116∠50	304∠40	172∠65 СП	70∠60 СЛ
12a	17	Левый берег р. Сусуя на юг от пос. Санаторный 47.06.13.2 N, 142.36.54.6 E, древнее ЛСС по трещинам	320∠40	228∠2	134∠50	316∠85 С	150∠5 С
12б	17	Левый берег р. Сусуя на юг от пос. Санаторный Молодое ЛСС по бороздам скольжения	159∠35	35∠38	274∠30	305∠87 ВП	40∠40 ВД
13	18+19 (2+3)	Западный склон Тонино-Анивского хребта 46.40.58.4 – 46.40.58. 4 N; 143.27.00.2 – 143.27.12.7 E.	82∠10	218∠74	348∠10	302∠89 СЛ	212∠74 П
14a	20a (4a)	Мыс Птичий, 100 м от Охотского моря 46.38.16.7 N; 143.30.42.3 E. Вишечее крыло разлома	347∠30	182∠56	80∠5	350∠78 ВП	228∠62 ВЛ
14б	20 б, в (4б)	20 м на юг от т. 20 а, лежачее крыло разлома	322∠20	64∠26	195∠55	342∠71 СЛ	103∠32 СП
14 в	20 в	Мыс Птичий, у Охотского моря, 100 м от т. 4a на восток	20∠20	150∠60	280∠20	238∠89 ВЛ	150∠60 П

О к о н ч а н и е т а б л и ц ы

E n d o f t h e T a b l e

№ объе- мов	Точка набл.	Район	$\sigma_1$ , аз. и угол падения	$\sigma_2$ , аз. и угол падения	$\sigma_3$ , аз. и угол падения	$\tau_{\max}$ , аз. и угол падения, тип	$\tau_{\max}$ , аз. и угол падения, тип
15	21	Западный склон Тонино- Анивского хребта 46.39.21.2 N, 143.28.41.1 E	152 $\angle$ 10	246 $\angle$ 18	34 $\angle$ 68	168 $\angle$ 58 <u>ДС</u>	312 $\angle$ 38 ПС
16	22	Левобережье р. Лютога в 5 км на восток от д. Огоньки, 46.46.44.6 N; 142.28.58.5 E	188 $\angle$ 5	293 $\angle$ 64	97 $\angle$ 24	225 $\angle$ 76 <u>СД</u>	322 $\angle$ 68 <u>СП</u>
17 а	23	Левый берег р. Цунай под мостом на трассе Южно-Сахалинск – Холмск	16 $\angle$ 15	116 $\angle$ 26	254 $\angle$ 56	38 $\angle$ 62 ЛС	162 $\angle$ 35 СП
18	25	Берег Татарского пролива, западный склон г. Дозор 47.22.35.1 N; 141.59.53.0 E	152 $\angle$ 30	20 $\angle$ 50	255 $\angle$ 26	294 $\angle$ 85 ВП	30 $\angle$ 50 ВД
19	26	Берег Татарского залива, с. Симаково, борг дороги	318 $\angle$ 10	54 $\angle$ 21	204 $\angle$ 61	337 $\angle$ 60 <u>СЛ</u>	110 $\angle$ 40 СП
20	27	Трасса Южно-Сахалинск – Холмск, перевал Холмский 47.03.30.09 N, 142.07.01.5 E	52 $\angle$ 15	322 $\angle$ 0	237 $\angle$ 70	50 $\angle$ 60 С	235 $\angle$ 30 С
21 а	28	Карьер Южно-Соколовский, восточная стенка, второй сверху уступ, молодое поле	256 $\angle$ 70	40 $\angle$ 18	132 $\angle$ 12	118 $\angle$ 58 <u>ЛВ</u>	333 $\angle$ 38 <u>ПВ</u>
21 б	28	Карьер Южно-Соколовский, восточная стенка, древнее поле	42 $\angle$ 18	260 $\angle$ 70	130 $\angle$ 12	47 $\angle$ 58 <u>ВД</u>	196 $\angle$ 36 Л
22	29	Карьер Южно-Соколовский, верхний уступ, лежащее крыло разлома	268 $\angle$ 70	130 $\angle$ 12	36 $\angle$ 10	46 $\angle$ 60 ПВ	286 $\angle$ 36 ЛВ
23	31 а	Пос. Ильинская, левый берег р. Жасминка	319 $\angle$ 30	104 $\angle$ 53	216 $\angle$ 18	178 $\angle$ 80 ВЛ	81 $\angle$ 54 <u>ВД</u>
24	31 б	Пос. Ильинская, правый берег р. Жасминка	206 $\angle$ 25	94 $\angle$ 40	320 $\angle$ 40	174 $\angle$ 80 СП	76 $\angle$ 40 Л
25	32	Поясок, 47.57.13.8 N; 142.20.59.3 E	306 $\angle$ 3	216 $\angle$ 74	38 $\angle$ 14	262 $\angle$ 80 П	170 $\angle$ 76 Л
26	33	Северная окраина пос. Взморье	234 $\angle$ 60	26 $\angle$ 16	122 $\angle$ 10	100 $\angle$ 60 ВЛ	330 $\angle$ 42 <u>ВД</u>
27	35	Правый берег р. Веселый 46.43.36 N; 142.26.55 E	145 $\angle$ 10	297 $\angle$ 76	53 $\angle$ 5	4 $\angle$ 85 ВД	273 $\angle$ 68 П
28 а	36	Карьер Известковый, 46.53.8.N, 142.20.59.30 E восточная стенка, верхний уступ, молодое поле	155 $\angle$ 20	359 $\angle$ 56	250 $\angle$ 10	290 $\angle$ 80 <u>ВД</u>	25 $\angle$ 76 ВД
28 б	36	Карьер Известковый, древнее поле	92 $\angle$ 42	194 $\angle$ 14	300 $\angle$ 45	104 $\angle$ 88 С	196 $\angle$ 13 П
29	37	Карьер Известковый, восточная стенка, верхний уступ, 100 м южнее т. 36	144 $\angle$ 47	3 $\angle$ 35	256 $\angle$ 20	285 $\angle$ 72 ВП	38 $\angle$ 40 ВД

П р и м е ч а н и е. Азимут и угол погружения осей главных нормальных напряжений:  $\sigma_1$  – ось растяжения,  $\sigma_2$  – промежуточная ось,  $\sigma_3$  – ось сжатия;  $\tau_{\max}$  – азимут и угол падения плоскости действия максимальных касательных напряжений; кинематический тип: В – взброс, С – сброс, Л – левый сдвиг, П – правый сдвиг. Подчеркнуты буквы с доминирующим типом перемещения (ПВ – правый сдвиг-взброс, взбросовая компонента больше сдвиговой). Общее поле напряжений:  $\sigma_1$  – 350 $\angle$ 10,  $\sigma_2$  – 112 $\angle$ 66,  $\sigma_3$  – 260 $\angle$ 20,  $\tau_{\max}$  32 $\angle$ 83, СЛ,  $\tau_{\max}$  125 $\angle$ 68, СП.

N o t e. Azimuths and dip angles of the axes of the main normal stresses:  $\sigma_1$  – axis of extension,  $\sigma_2$  – intermediate axis,  $\sigma_3$  – axis of compression;  $\tau_{\max}$  – azimuth and dip angle of the plane of the maximum tangential stresses; kinematic types of faults: В – reverse, С – normal, Л – left-lateral strike-slip, П – right-lateral strike-slip. Underlined are letters corresponding to the dominant type of displacement (ПВ – right-lateral reverse fault with strike-slip component: the reverse component exceeds the strike-slip component). The total stress field:  $\sigma_1$  – 350 $\angle$ 10,  $\sigma_2$  – 112 $\angle$ 66,  $\sigma_3$  – 260 $\angle$ 20,  $\tau_{\max}$  32 $\angle$ 83, СЛ,  $\tau_{\max}$  125 $\angle$ 68, СП.

Выбор такой ориентировки объясняется двумя причинами. На рис. 4, Б показан единственный задокументированный вектор перемещения (замер 35), требующий именно такого положения оси сжатия согласно кинематическому методу. Кроме этого, при смене местами оси сжатия и растяжения перемещение по разлому  $R_1PR_2$  должно быть левым сбросо-сдвигом, что противоречит геологическим данным. Нахождение оси сжатия в тупом углу между сопряженными трещинами можно объяснить и разворотом сколовых трещин при значительном деформировании пород – ранние трещины расходятся от оси сжатия, образуя асимметрию в распределении трещин [Nikolaev, 1992].

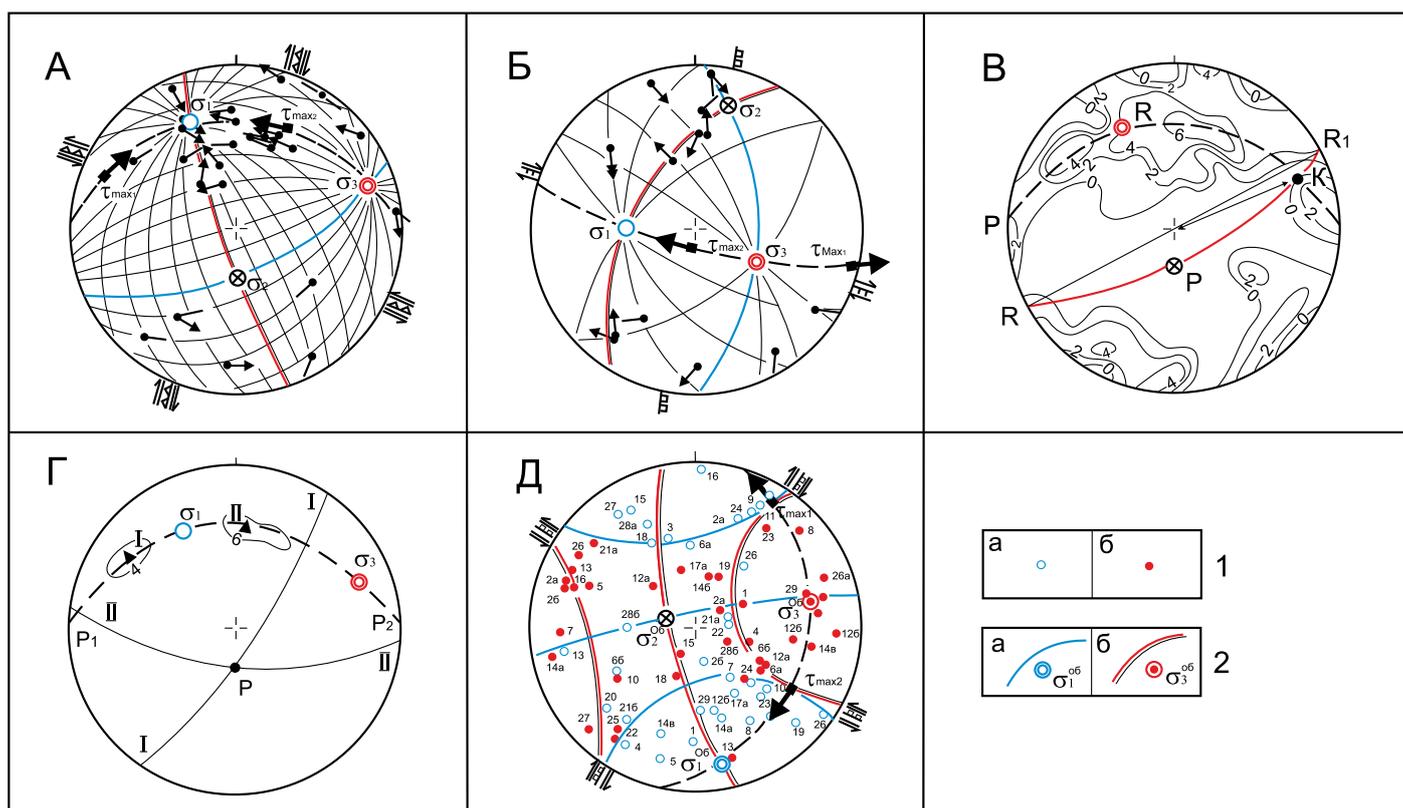
Неординарный пример реконструкции тектонических напряжений приведен на рис. 4, В. ЛСС восстановлено на правом берегу р. Веселый (т.ч. 35, объем 27, таблица); здесь удалось обнаружить 8 плоскостей со следами перемещений в плейстоценовых аллювиально-пролювиальных суглинках, при этом на трех из них (замеры 5, 7, 8) установлены лишь вертикальные компоненты взбросовых и надвиговых смещений. По замерам 3а, 3б, 6 и 9 восстановлен с невысокой достоверностью сдвиговый тип ЛСС, но распределение малого числа полюсов трещин тяготеет к плоскостям действия  $\tau_{\max}$ , что по методике сколовых сопряженных трещин может служить подтверждением правомочности реконструкции ЛСС. Замеры сбросовых перемещений 1 и 2 противоречат найденному ЛСС, вероятнее всего, это были следы оползания склона.

Пример выделения двух ЛСС приведен на рис. 4, Г–Д. Борозды скольжения зафиксированы в Южно-Соколовском карьере. Здесь, во втором сверху уступе, вскрыт меланж Западно-Сусунайского субтеррейна [Zharov, 2004], представленный брекчированными кремнистыми породами, чередующимися с пластинами серпентинитов. Породы разбиты плоскостью разлома во всю высоту уступа, вскрытой длиной около 10 м с гигантскими бороздами скольжения. Аз. пад. плоскости  $210^\circ$ , угол пад.  $60^\circ$ , тип перемещения – левый сбросо-сдвиг. Висячем крыле этого разлома измерена ориентировка 37 векторов перемещений, по большинству из которых восстановлено ЛСС (объем 21а, таблица, рис. 4, Г). Это ЛСС принято более молодым, так как большинство борозд скольжения являются следами последних перемещений. Векторы перемещений (борозды скольжения), противоречащие реконструированному ЛСС, выделены специальным знаком. Вынесенные на отдельную стереограмму (рис. 4, Д), эти векторы могут соответствовать древнему ЛСС, если переиндексировать промежуточную ось  $\sigma_2$  с осью растяжения  $\sigma_1$  молодого поля. При сохранившейся ориентации оси сжатия  $\sigma_3$  часть векторов перемещений, сформированных

при одноосном сжатии, согласуются с этим вторым ЛСС. Меньшее количество борозд скольжения, участвовавшее в определении этого ЛСС, их плохая сохранность позволили определить это ЛСС как более древнее. В лежащем крыле обсуждаемого разлома в этом же карьере на верхнем уступе в т.н. 29 измерено 19 векторов перемещения, по которым восстановлено одно ЛСС (объем 22, таблица); ориентировка растяжения  $\sigma_1$  соответствует молодому ЛСС (объем 21а), но в объеме 22 ось сжатия  $\sigma_3$  поменялась местами с промежуточной осью  $\sigma_2$ . Такая переиндексация осей главных нормальных напряжений в разных крыльях разломов отмечена по данным моделирования сдвигов [Osokina, 1987] и при изучении разломов в реальной геологической среде [Sim et al., 2011]. Хорошая сохранность борозд скольжения в лежащем крыле разлома дает возможность отнести возраст ЛСС в объеме 22 к более молодому. При этом на рис. 4, Е, показана плоскость обсуждаемого разлома, векторы перемещения висячего крыла, зафиксированные в карьере, и положение осей главных нормальных напряжений в разных крыльях разлома.

Примером выделения разновозрастных тектонических напряжений служат результаты реконструкций ЛСС по векторам перемещений, измеренных в карьере Известковый (рис. 5, А–Г).

В средней части склона в стенке карьера, ориентированной широтно, вскрыты сильно дислоцированные ультраосновные породы Западно-Сусунайского террейна, сложенного меловыми – среднеэоценовыми породами [Zharov, 2004; Grannik, 2008]. Измеренные 40 векторов перемещений на зеркалах скольжения (рис. 6) вызвали определенные затруднения при реконструкции осей ЛСС. Тем не менее по 25 векторам скольжения удалось определить сдвиговое ЛСС с субмеридиональной пологой осью растяжения  $\sigma_1$  и субширотной осью сжатия  $\sigma_3$  (см. рис. 5, А), отнесенное к молодому стресс-состоянию. Противоречащие этому ЛСС векторы, вынесенные на отдельную стереограмму (рис. 5, Б), дали возможность определения ЛСС с погружающимися практически под одним углом к горизонту осями растяжения  $\sigma_1$  и сжатия  $\sigma_3$ , близким к  $45^\circ$  (смешанный геодинамический тип, древнее поле). Полюсы трещин с бороздами скольжения явно показали поясное распределение (см. рис. 5, В). Выделенный пояс трещин с полюсом в т.ч. Р свидетельствует о взаимосвязи ЛСС с перемещением по разлому. Ближайший новейший разлом, секущий Сусунайское поднятие и по структурно-геоморфологическим данным несущий признаки правого сдвига, сечет все структуры Южного Сахалина (см. рис. 2) и служит ЮВ ограничением континентальной части Центрально-Сахалинской впадины, а также в общих чертах Сусунайского террейна, который



**Рис. 5.** Стереогаммы тектонических напряжений и общего поля напряжений Южного Сахалина.

1 – оси главных нормальных напряжений ЛСС (таблица, объемы № 28а, 28б): а – растяжения, б – сжатия; 2 – оси общего поля напряжений и плоскости их действия: а – растяжения, б – сжатия. Остальные условные обозначения на рис. 4: А–Г – карьер Известковый: А – молодое поле, 25 замеров, Б – древнее поле, 13 замеров, В – пояс трещин, плоскость разлома и линия перемещения по ней, 40 замеров, Г – ЛСС по методике [Gzovsky, 1975]; Д – общее поле напряжений Южного Сахалина. Объяснения в тексте.

**Fig. 5.** Stereograms of tectonic stresses and the total stress field of the Southern Sakhalin.

1 – axes of the main normal stresses of LSS (Table, volumes 28a and 28b): a – extension, б – compression; 2 – axes of the total stress field and their planes: a – extension, б – compression. See other symbols in Fig. 4: А–Г – Lime quarry: А – recent field (25 measurements), Б – ancient field (13 measurements), В – fracture belts, fault planes and displacement lines (40 measurements), Г – LSS according to the method described in [Gzovsky, 1975]; Д – total stress field of the Southern Sakhalin. Explanations in the text.

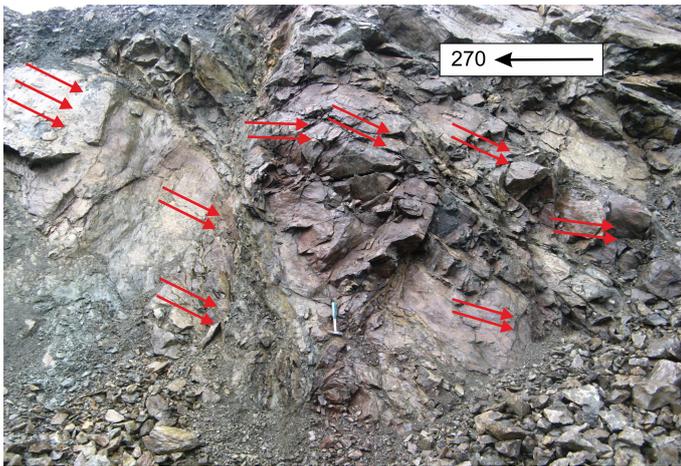
рассечен многочисленными разломами аналогичного простирания [Zharov, 2004]. По методике [Danilovich, 1961] были определены: ось пояса (т.чк. Р), плоскость разлома  $RR_1$ , падение его плоскости на ЗСЗ и линия перемещения по нему, идущая от центра к т.чк. К, свидетельствующая о преобладании сдвиговой компоненты перемещения (см рис. 5, В). В общем поле напряжений Южного Сахалина этот разлом может реализоваться как правый взбросо-сдвиг с преобладанием горизонтальной компоненты смещения.

По центрам максимумов трещин с бороздами скольжения (4 и 6 %) были выделены две соответствующие им плоскости I-I и II-II (см. рис. 3, Г), по биссектрисе острого угла между которыми должна быть ось сжатия  $\sigma_3$ , а в створе тупого угла – ось растяжения. Ось пояса Р должна при этом быть

промежуточной осью  $\sigma_2$  [Danilovich, 1961]. Сопоставление ЛСС на стереогаммах рис. 3, А, Г, полученных разными методами, свидетельствует о том, что более молодое ЛСС определено правильно, так как пояс трещин определен по всему комплексу измеренных борозд скольжения – свидетельств наиболее поздних перемещений, а также что более молодое ЛСС относится к сдвиговому типу.

### 3.2. РЕГИОНАЛЬНОЕ (ОБЩЕЕ) ПОЛЕ ЮЖНОГО САХАЛИНА

По данным о ЛСС (таблица), методом нахождения общих полей тектонических напряжений [Sim, 1982] восстановлено региональное поле Южного Сахалина. Так как в пяти однородно-осных объемах восстановлено по два ЛСС (объемы 2, 6, 12, 21, 28) и



**Рис. 6.** Крупные борозды скольжения в сильно дислоцированных ультраосновных породах Западно-Сусунайского террейна. Карьер Известковый, т.н. 36, объем 28а (см. рис. 3, таблица). Ориентировки плоскостей с бороздами скольжения: аз. пад.  $30^\circ/78^\circ$ ,  $20^\circ/60^\circ$ ,  $0^\circ/62^\circ$ ,  $14^\circ/60^\circ$ ,  $355^\circ/54^\circ$ , векторы перемещений наклонены к горизонту под углами  $8-20^\circ$ , кинематический тип: сбросо-сдвиг правый.

**Fig. 6.** Large sliding grooves in the strongly deformed ultramafic rocks of the West Susunai terrain. Lime quarry, observation point 36, volume 28a (see Fig. 3, Table). Orientations of planes with sliding grooves: azimuth  $30^\circ/78^\circ$ ,  $20^\circ/60^\circ$ ,  $0^\circ/62^\circ$ ,  $14^\circ/60^\circ$ , and  $355^\circ/54^\circ$ ; the displacement vectors are inclined to the horizon at the angle of  $8-20^\circ$ ; kinematic type: right-lateral strike-slip.

в одном – три – объем 14, в определении общего поля участвовало 36 локальных осей сжатия и растяжения. Их распределение на стереограмме позволило определить конусы сжатия и растяжения и общее поле напряжений со следующими параметрами:  $\sigma_1 - 350^\circ/10^\circ$ ,  $\sigma_2 - 112^\circ/66^\circ$ ,  $\sigma_3 - 260^\circ/20^\circ$ ,  $\tau_{\max} 32^\circ/83^\circ$ , СЛ,  $\tau_{\max} 125^\circ/68^\circ$ , СП (см. рис. 5, Д).

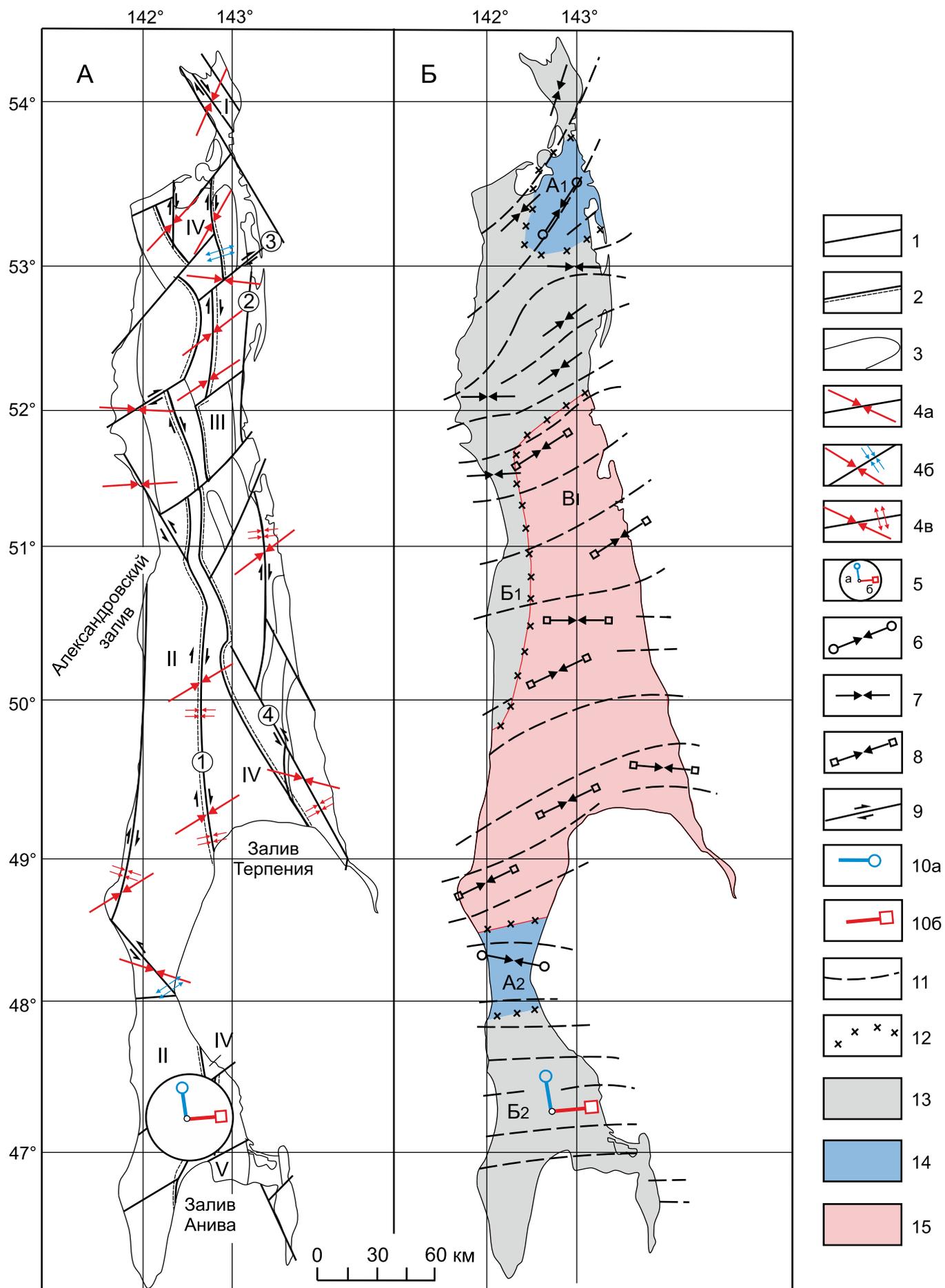
При этом в конусах сжатия и растяжения результаты реконструкции осей ЛСС в объеме 13 противоречат найденному общему полю, так как ось сжатия объема 13 попадает в конус растяжения, а ось растяжения – в конус сжатия (см. рис. 5, Д). Это определение сделано по бороздам скольжения, измеренным на западном склоне Тонино-Анивского хребта (т.н. 18, 19). Такое противоречие может быть обусловлено тем, что измерения произведены в каком-нибудь экзотическом участке террейна со следами ранних (вероятно, палеогеновых) перемещений с последующими вращениями и непредсказуемыми разворотами. В пользу последнего предположения говорит то, что объем 13 включает в себя минимальное количество борозд скольжения, объединенных из двух точек наблюдения в скальных обнажениях (т.н. 18 и т.н. 19 на

расстоянии около 1200 м друг от друга), по дороге к Охотскому морю вдоль р. Гремучка (см. рис. 3, объем 13). Относительно равномерное распределение осей сжатия и растяжения ЛСС по всей площади стереограммы говорит о трехосном напряженном состоянии на Южном Сахалине. При одноосном напряженном состоянии оси сжатия и растяжения концентрируются, соответственно, в одноименных конусах [Sim, 2000].

### 3.3. НОВЕЙШИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СЕВЕРНОГО И ЦЕНТРАЛЬНОГО САХАЛИНА

Реконструкция неотектонических напряжений Северного и Центрального Сахалина проводилась СГ методом [Sim, 1991] по топографической основе масштаба 1:500000 и космическому снимку Landsat-5 TM. СГ метод основан на закономерностях ориентировок оперяющих трещин в зонах сдвигов как по полевым, так и по экспериментальным данным, обобщенным в работе [Gzovsky, 1975]. Ориентация триады оперяющих трещин, состоящей из двух систем сопряженных сколов и трещин отрыва, как относительно друг друга, так и по отношению к плоскости сдвига, меняется в зависимости от способа приложения напряжений, вызывающих сдвиговое перемещение. При моделировании сдвигов установлено, что при дополнительном сжатии, приложенном поперек плоскости сдвига, триада трещин разворачивается вместе с осью сжатия. Угол между плоскостью сдвига и осью сжатия становится больше  $45^\circ$ , а при дополнительном растяжении – меньше  $45^\circ$ . Если в зоне динамического влияния предполагаемого сдвига дешифрируются мелкие прямолинейные элементы рельефа, которые идентифицируются с триадой оперяющих трещин в зонах сдвигов, то по их ориентации к плоскости сдвига определяется ориентировка оси сжатия, знак (правый-левый) сдвигового перемещения, а также геодинамическая обстановка формирования сдвига – дополнительное растяжение (или сжатие) (рис. 7). Возраст восстановленных СГ методом тектонических напряжений определяется как более молодой по сравнению с возрастом отложений, нарушенных в зоне сдвига, т.е. на Северном и Центральном Сахалине он принят как неотектонический.

На рис. 7, А, показаны новейшие структуры, выделенные на рис. 2, и ориентировки осей сжатия в горизонтальной плоскости; они приурочены к тем отрезкам разлома, вокруг которых дешифрированы мегатрещины, соответствующие оперяющим разрывам в зонах динамического влияния сдвигов. По разломам северо-восточного и субмеридионального простирания восстановлены правосдвиговые перемещения, что согласуется с данными предше-





**Рис. 7.** Схема новейшей геодинамики о. Сахалин.

А – неотектонические структуры и оси главных нормальных напряжений. 1–3 – неотектонические структуры: 1 – разломы, выделенные по геоморфологическим данным, 2 – границы структур 1-го порядка, 3 – границы поднятий и впадин. Цифрами обозначены поднятия: I – Шмидтовское, II – Западно-Сахалинское, III – Восточно-Сахалинское, V – Сусунайское; впадины: IV – Центрально-Сахалинская. 4 – Северный и Центральный Сахалин – оси сжатия в горизонтальной плоскости, восстановленные СГ методом, сопровождаемые: а – трехосным напряженным состоянием, б – обстановкой дополнительного растяжения, в – обстановкой дополнительного сжатия; 5 – Южный Сахалин – оси алгебраически минимальных (а) и максимальных (б) сжимающих напряжений общего поля напряжений, восстановленных по банку данных о локальных стресс-состояниях (ЛСС). Крупнейшие разломы (цифры в кружках): 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Хоккайдо-Сахалинский, 3 – Верхнепильтунский, 4 – Набильский. Б – схема районирования областей с разной геодинамической обстановкой. 6–8 – оси сжатия, восстановленные СГ методом в разных геодинамических обстановках: б – дополнительного растяжения, 7 – трехосного напряженного состояния, 8 – дополнительного сжатия; 9 – сдвиги; 10 – оси главных нормальных напряжений, восстановленные методом нахождения общих полей напряжений по данным о ЛСС: а – растяжения, б – сжатия; 11 – траектории субгоризонтальных осей сжатия; 12 – границы областей с разной геодинамической обстановкой; 13 – области с обстановкой дополнительного растяжения – А<sub>1</sub> – Северная, А<sub>2</sub> – Поясок; 14 – области с трехосным напряженным состоянием: Б<sub>1</sub> – Западная, Б<sub>2</sub> – Южно-Сахалинская; 15 – области с обстановкой дополнительного сжатия: В – Центрально-Сахалинская.

**Fig. 7.** The Sakhalin Island recent geodynamics scheme.

А – neotectonic structures and axes of the main normal stresses. 1–3 – neotectonic structures: 1 – faults identified from the geomorphological data, 2 – boundaries of the first-order structures, 3 – boundaries of uplifts and depressions. Uplifts: I – Schmidt, II – Western Sakhalin, III – Eastern Sakhalin, V – Susunai. IV – Central Sakhalin depression. 4 – Northern and Central Sakhalin – axes of compression in the horizontal plane (reconstruction by the method of structural geology), which is accompanied by: а – triaxial stress state, б – additional extension, в – additional compression; 5 – Southern Sakhalin – axes of algebraically minimal (а) and maximal (б) compression stresses of the total stress field, which were reconstructed from the database on the local stress state (LSS). Major faults (numbers in circles): 1 – Central Sakhalin 2 – Hokkaido–Sakhalin, 3 – Verhnepiltunsky, 4 – Nabilsky. Б – schematic zoning scheme showing the areas with different geodynamic settings. 6–8 – axes of compression, reconstructed by the method of structural geology in different geodynamic settings: 6 – additional extension, 7 – triaxial stress state, 8 – additional compression; 9 – strike-slip faults; 10 – axes of the main normal stresses, reconstructed from the total stress fields according to the data on LSS: а – extension, б – compression; 11 – trajectories of subhorizontal axes of compression; 12 – boundaries of areas with different geodynamic settings; 13 – areas with additional extension: А<sub>1</sub> – Northern, А<sub>2</sub> – Poyasok; 14 – areas with triaxial stress state: Б<sub>1</sub> – Western, Б<sub>2</sub> – Yuzhno–Sakhalinsk; 15 – areas with additional compression: В – Central Sakhalin.

ственников [Rozhdestvensky, 1969, 1987, 1997; Rogozhin, 1996; Kozhurin, 2013].

В целом ось сжатия ориентирована субширотно, но на Северном Сахалине она начиная от широты 52° приобретает преимущественно северо-восточную ориентировку; при этом исключение составляет ССВ сжатие, восстановленное по небольшому разлому СЗ простирания на полуострове Шмидта. Вдоль Набильского разлома СЗ простирания на двух участках восстановлены левосдвиговые смещения.

Обстановка дополнительного сжатия в целом преобладает на всей восточной части Центрального Сахалина, трехосное напряженное состояние установлено на Северном и Южном Сахалине и по небольшому СЗ участку Набильского разлома (рис. 7, А, Б).

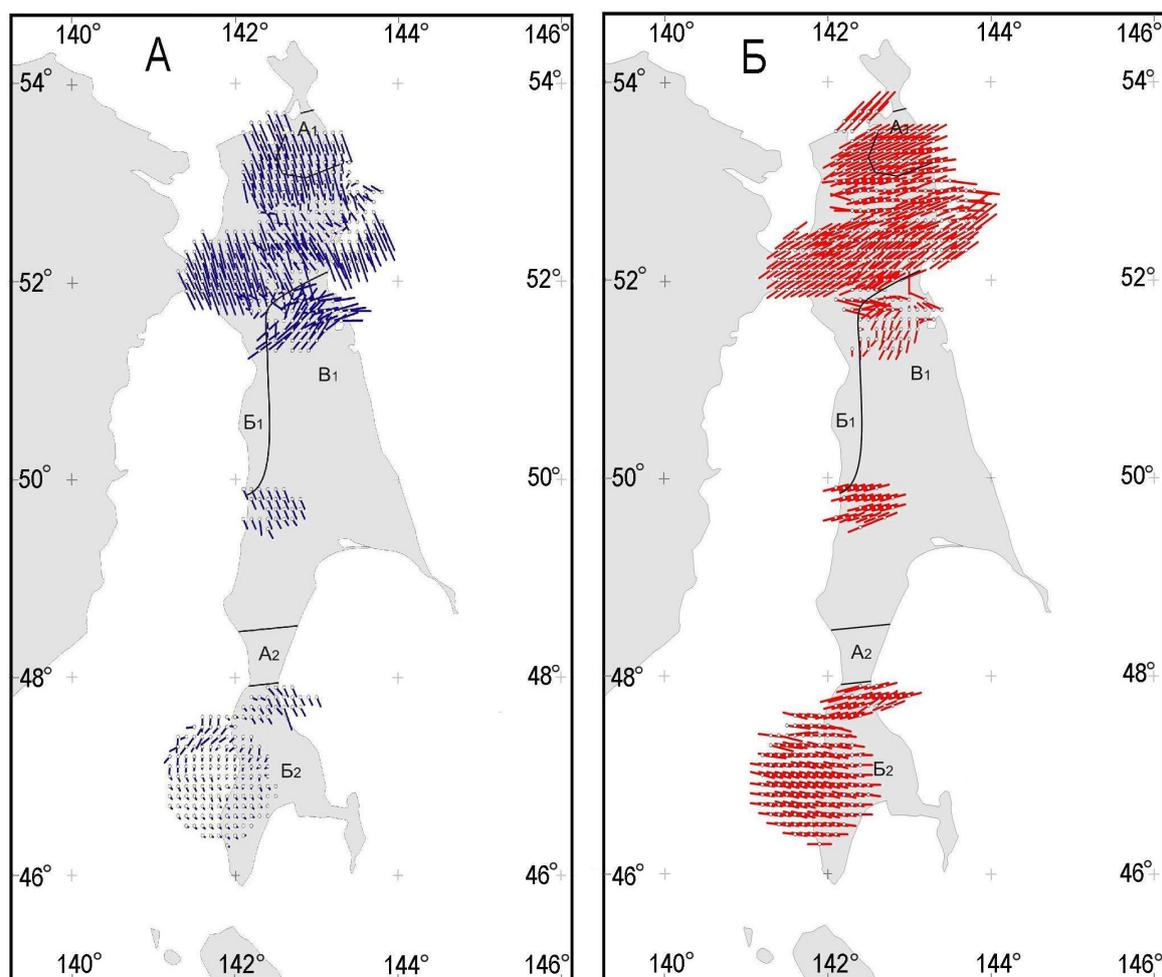
#### 4. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И НОВЕЙШАЯ ГЕОДИНАМИКА САХАЛИНА

##### 4.1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Сейсмичности Сахалина посвящены многочисленные работы [Soloviev et al., 1967; Rogozhin et al.,

2002; Zlobin, 2005; Levin, Tikhonov, 2009; Konovalov et al., 2014; Tataurova, 2015]. Механизмы очагов землетрясений Сахалина проанализированы с применением катакластического метода [Rebetsky, 2007]. Для исследования использовались каталоги СМТ и геофизической службы РАН. Всего в анализе участвовало 222 определения, магнитуды которых менялись от 3.3 до 7.3, глубины очагов – от 3 до 611 км.

В анализе использованы события с 1978 г. по январь 2015 г. и одно событие 1967 г. Реконструкция проводилась для каталогов магнитуд от 3.3 до 5.3 и от 5.3 до 7.3, также было проведено разделение по глубинам до 60 км – 176, от 60 до 200 км – 5 и 200–611 км – 40 событий. Обработка исходных сейсмологических данных производилась в длиннопериодном режиме реконструкции в узлах сетки 0.1×0.1 и глубиной 20 км, 130 км и 400 км. Наибольший вклад внесли определения на небольших глубинах, где реконструкция проводилась в середине условной коры (20 км). Узлы сетки определяли только центры формирования однородных выборок. Каталог механизмов был обработан с помощью программы STRESSseism [Rebetsky, 1999]. Результатом реконструкции являются данные об ориентации главных осей тензора напряжений.



**Рис. 8.** Ориентация осей главных максимальных девиаторных напряжений растяжения (А) и сжатия (Б) на горизонтальной плоскости. Кружком обозначается точка, в которой находится начало вектора погружения; при углах погружения менее  $15^\circ$  кружок располагается на середине вектора погружения. Черными линиями показаны границы областей с разной геодинамической обстановкой (см. рис. 4).

**Fig. 8.** Orientations of axes of the main maximum deviatoric stresses of extension (A) and compression (B) on the horizontal plane. A circle marks the beginning of a dip vector; if the dip angle is less than  $15^\circ$ , the circle is located in the middle of the dip vector. Black lines show the boundaries of the areas with different geodynamic settings (see Fig. 4).

На рис. 8, А, показаны ориентации осей максимальных девиаторных растяжений, на рис. 8, Б – сжатий. Сейсмичность Северного и Южного Сахалина значительно более активная, чем сейсмичность в центральной части острова, а также сейсмически более активна западная часть острова по сравнению с восточной. При этом на Северном Сахалине доминируют СВ ориентировки субгоризонтальных осей максимального девиаторного сжатия, меняющиеся южнее до широты  $53^\circ$  с.ш. на ВСВ ориентировки. Непосредственно южнее  $53^\circ$  с.ш. выделяется первая широтная полоса неустойчивых ориентировок осей напряжений; в этой полосе обращает на себя внимание участок с субвертикальной ориентировкой оси растяжения (рис. 8, А), фиксирующей геодинамический режим горизон-

тального сжатия, ориентированного здесь субширотно (рис. 8, Б). К этой части относится и механизм разрушительного Нефтегорского землетрясения 1995 г. [Konovalov et al., 2014], макроскопические результаты которого изучены [Rogozhin, 1996, 2012; Rogozhin et al., 2002]. Это событие отличается значительным разнообразием механизмов афтершоков очагов землетрясений с аномальными ориентировками промежуточных осей СВ, СЗ, меридионального и широтного простирания, согласно [Konovalov et al., 2014]. Между  $51^\circ$  и  $52^\circ$  с.ш. выделяется вторая полоса неустойчивых ориентировок осей напряжений. В работе [Konovalov et al., 2014] выделены три механизма очагов землетрясений с осями сжатия СЗ, широтного и СВ простирания, что согласуется с нашими данными о неустой-

чивости ориентировок осей напряжений в этой части.

В пределах трапеции с координатами 49.5–50.0° с.ш. и 142.0–142.9° в.д. выделена изолированная группа механизмов очагов землетрясений с субгоризонтальной широтной ориентировкой максимального девиаторного сжатия и погружающимися круто на юго-восток – растяжения, что приближается к геодинамическому режиму горизонтального сжатия. Западная часть Южного Сахалина характеризуется устойчивыми широтными ориентировками горизонтального сжатия, которые при приближении к перешейку Поясок становятся менее устойчивыми, изменяя ориентировку на ЗСЗ и ВСВ. Здесь же крутые ориентировки максимального девиаторного растяжения на западе становятся неустойчивыми при продвижении на восток, где в центральной части отмечаются крутые, а далее – пологие углы погружения на ЮВ в восточной части. Для этой части острова в работе [Kononov et al., 2014] даны два механизма очагов землетрясений с ВСВ ориентировкой оси сжатия, отличающейся от широтной ориентации на более южной территории. Таким образом, выделенные полосы субширотной зональности современного напряженного состояния не противоречат данным [Kononov et al., 2014] за 1961–2011 гг.

#### 4.2. СХЕМА НОВЕЙШЕЙ ГЕОДИНАМИКИ САХАЛИНА

На основе реконструкции неотектонических напряжений составлена схема новейшей геодинамики Сахалина (см. рис. 7), состоящая из двух частей: 7, А – неотектонические структуры и оси главных нормальных напряжений, восстановленные СГ методом на Северном и Центральном Сахалине и комплексом структурных и тектонофизических методов – на Южном Сахалине.

Эта схема является фактическим материалом для составления схемы районирования областей с разной геодинамической обстановкой с траекториями субгоризонтальных осей сжатия (см. рис. 7, Б), на которую вынесены ориентировки субгоризонтальных осей сжатия и геодинамические обстановки на участках их определения. На схеме проведена экстраполяция полученных ориентировок осей сжатия с проведением изолиний, соответствующих траектории осей сжатия по острову. По геодинамической обстановке выделены следующие области: А – дополнительного растяжения (А<sub>1</sub> – Северная, А<sub>2</sub> – Поясок); Б – трехосного напряженного состояния (Б<sub>1</sub> – Западная, Б<sub>2</sub> – Южно-Сахалинская), В – дополнительного сжатия (Центрально-Сахалинская). К двум областям дополнительного растяжения тяготеют наиболее узкие участки острова, напоминающие «шейки растяжения» при бу-

динаже, что согласуется с данными нашего районирования, выполненного на основании геодинамической обстановки формирования новейших разломов. Широтные горизонтальные оси сжатия на юге, восстановленные разными методами, при продвижении на север приобретают ВСВ и СВ ориентировки, хотя на отдельных участках разломов восстановлены и широтные ориентации.

#### 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Важным вопросом при анализе векторов перемещений, измеренных в пределах Южного Сахалина, является определение возраста восстановленных ЛСС. Современный возраст тектонических напряжений, восстановленных по трещиноватости и бороздам скольжения, измеренных в четвертичных суглинках в бассейнах р. Лютога и р. Веселый (см. рис. 3, объемы № 16 и 27), не вызывает сомнения. Отметим, что оба определения характеризуются сдвиговым типом напряженного состояния с субгоризонтальными осями сжатия и растяжения; новейший возраст напряжений, восстановленных вдоль побережья Татарского залива в р-не г. Невельск, пос. Симакова, Ильинское и др. (см. рис. 3) определяется тем, что трещины и зеркала скольжения измерены в неогеновых отложениях. При этом в р-не пос. Санаторный (см. рис. 3, объем 12, таблица) по максимумам трещиноватости в неогеновых породах восстановлено более древнее ЛСС (объем № 12а), а по бороздам скольжения на этих трещинах (объем № 12 б) – более молодое, которое близко к сдвиговому типу напряженного состояния с преобладанием сдвиговой компоненты перемещений по плоскостям действия максимальных касательных напряжений. В таких случаях можно предположить, что молодое ЛСС характеризует орогенный (эоплейстоцен-современный), а более древнее – складчатый этап развития территории. Значительно сложнее датировать ЛСС, восстановленные в более древних породах Сусунайского и Тонино-Анивского террейнов, где возможности изучения тектонических напряжений существенно шире в связи с наличием выработок в карьерах с непрерывным площадным и вертикальным вскрытием пород с векторами перемещений по трещинам (см. рис. 3, объемы № 1, 4, 6 (а, б), 8, 9, 21 (а, б), 28 (а, б), 29, таблица). При разделении разновозрастных тектонических напряжений в более древних породах в расчет принималось следующее: оценивалась сохранность борозд скольжения, анализировались два наложенных вектора перемещений на одной плоскости с определением их относительного возраста (как правило, по более древним определить знак смещения не удавалось из-за их

затертости более поздними смещениями), соблюдался принцип преобладания молодых векторов перемещений. По этим признакам определен относительный возраст в объемах 6, 21а, 28а.

Анализ геодинамических режимов каждого ЛСС показал преобладание в них сдвигового геодинамического режима с субгоризонтальными осями сжатия и растяжения (17 определений). Даже в четвертичных отложениях (объемы № 16 и 27, см. выше) определен сдвиговый тип напряженного состояния.

Уверенное взбросовое поле (режим горизонтального сжатия с углами наклона осей растяжения 60–70°) восстановлено только по бороздам скольжения, измеренным вблизи г. Невельск (объем № 26), в карьере Южно-Соколовский (объемы № 21а и 22) и на северной окраине пос. Взморье (объем № 26) в породах неогенового возраста. Кроме ЛСС, в перечисленных объемах отмечаются три ЛСС со смешанными геодинамическими режимами – взбросо-сдвиговые и сдвиго-взбросовые.

Эти данные говорят в пользу преобладания орогенного сдвигового режима на Южном Сахалине, что в обобщенном виде показано на стереограмме общего поля напряжений этой части острова. При этом в р-не г. Невельск по механизму очага Невельского землетрясения и по измерениям трещиноватости в этом районе установлено молодое взбросовое поле напряжений. Достаточно уверенно определен геодинамический режим с горизонтальным сжатием (взбросовые структуры) в Южно-Соколовском (объемы 21а и 22, позднее ЛСС), Петропавловском (объем 11) и Известковом (объемы 28а, 29, рис. 3) карьерах. Можно лишь предположить, что более молодое взбросовое поле напряжений действует крайне непродолжительное время. Его изучение возможно по механизмам очагов землетрясений, например в р-не г. Невельск, где оно подтверждено механизмом очага Невельского землетрясения. В целом необходимо отметить рациональность использования комплекса методов реконструкции тектонических напряжений, которые повышают достоверность полученных результатов. Например, в карьере Известковый по плотности трещин с зеркалами скольжения и по ориентировкам векторов перемещений по трещинам установлены идентичные ориентировки главных нормальных напряжений, характеризующих молодое напряженное состояние сдвигового типа. Правый взбросо-сдвиг по Центрально-Сахалинскому разлому, восстановленный с помощью анализа поясного распределения трещиноватости, согласуется с известными геологическими данными. Таким образом, можно утверждать, что на всем острове преобладает сдвиговое поле напряжений в новейший тектонический этап.

В зонах динамического влияния разломов распределение трещиноватости носит поясной характер, что дает возможность определения азимута и угла падения плоскостей сместителей, а также положения линии перемещения по этой плоскости. Поясное распределение трещин зафиксировано вблизи зоны Центрально-Сахалинского разлома на левобережье р. Лютога, в зоне разлома СВ простирания в карьере Известковом и др. Ориентировки оперяющих разрывов в зонах сдвигов легли в обоснование СГ метода, давшего возможность охарактеризовать новейшее напряженное состояние Северного и Центрального Сахалина. Опыт предыдущих полевых тектонофизических исследований на Балтийском щите, Северном Тянь-Шане показал, что ЛСС в разных крыльях разломов резко меняются [Sim, 2000; Sim et al., 2011, 2014]. Эти полевые исследования ЛСС в разных крыльях разломов целиком соответствуют данным моделирования тектонических напряжений в окрестностях разрывов [Osokina, 1987]. При этом очень часто ориентировки осей ЛСС локального уровня ориентированы нормально и параллельно плоскости сместителя разлома. Например, во фронтальной части правого взбросо-сдвига (см. рис. 4, Е, разлом СЗ простирания, вскрытый в Южно-Соколовском карьере) ось сжатия ЛСС точно совпадает с точкой выхода вектора перемещения по разлому, т.е. ось сжатия параллельна плоскости разлома, а ось растяжения  $\sigma_1$  перпендикулярна этой плоскости. Аналогичный пример такой же смены наименования осей главных нормальных напряжений в разных крыльях разлома задокументирован и в карьере на г. Юнона (объемы № 8 и 9). Хотя по данным математического и физического моделирования разломов такая смена ориентаций ЛСС характерна для концов разломов, в реальной геологической среде это явление встречается и в срединных частях разломов (вероятно, из-за неоднородности среды, влияющей на распределение ЛСС). Кроме этого, часто встречается и переиндексация осей сжатия (растяжения) с промежуточной осью  $\sigma_2$ . Заметим, что смещение по Центрально-Сахалинскому разлому в разных его частях восстановлено разными методами – на Центральном Сахалине – СГ методом, а на Южном – комплексом полевых методов.

Сопоставление распределения современной сейсмичности (рис. 8) со схемой новейшей геодинамики (см. рис. 7, Б) показывает, что северо-восточные ориентировки осей сжатия на Северном Сахалине совпадают с осями максимального девиаторного сжатия, восстановленного по механизмам очагов землетрясений; широтной ориентации оси сжатия новейшего этапа, восстановленной по Верхнепильтунскому разлому СГ методом, идеально соответствуют современные оси максимального девиа-

торного сжатия. Флуктуации современных ориентировок осей девиаторного сжатия и растяжения на Северном Сахалине на границах областей А<sub>1</sub> и Б<sub>1</sub>, южнее 52° с.ш. между областями Б<sub>1</sub> и В, а также образование очагов землетрясений на западе Центрального Сахалина (50° с.ш.) приурочены к границам с разной геодинамической обстановкой, выделенной по геолого-геоморфологическим и тектонофизическим данным. Аналогично к району, расположенному южнее границы между областями А<sub>2</sub> и Б<sub>2</sub> на рис. 7, Б, южнее перешейка Поясок на севере Южного Сахалина, приурочено изменение ориентировок осей девиаторного сжатия и растяжения. Проведенное сопоставление новейшего и современного напряженного состояния по структурно-геологическим данным и данным о механизмах очагов ЗЛТ показывает объективность выделения областей с различной геодинамической обстановкой на Сахалине (см. рис. 7, Б). В целом относительно слабая сейсмичность восточных районов Центрального и Южного Сахалина противоречит идее влияния смещения Охотской плиты на напряженное состояние острова – проведение этой границы обосновано повышенной сейсмичностью [Savostin et al., 1982]. Распределение ориентировок осей максимального девиаторного сжатия и растяжения свидетельствует скорее в пользу широтной сегментации современных полей напряжений и не подтверждает их отличия на западе и востоке от Центрально-Сахалинского разлома. Это согласуется с результатами [Filonenko, Pavlenkova, 2006], полученными при обработке данных ГСЗ по профилю ГСЗ ИФЗ-19, проходящему через Южный Сахалин с ЮЗ на СВ по азимуту 60° с примерными координатами: ЮЗ часть: 46°33' с.ш., 141°19' в.д., СВ часть – 47°3' с.ш., 143°2' в.д. На этом профиле внутри Сахалина нет глубинного разлома, который мог бы ассоциироваться с границей между Амурской и Охотской микроплитами по Центрально-Сахалинскому разлому. Вместе с тем на профиле выявлена наклонная отражающая площадка М1 на глубине 40–60 км западнее о-ва Сахалин, погружающаяся в сторону Охотского моря, которая может соответствовать Западно-Сахалинскому разлому.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования продемонстрировали продуктивность комплексирования тектонофизических методов и методов структурной геологии для районов с активной новейшей тектоникой. Статистически установлено доминирование сдвигового поля неотектонических напряжений с меридиональной ориентацией оси растяжения и широтной ориентировкой оси сжатия, которая в то

же время на Северном Сахалине ориентирована в северо-восточном направлении. На самых последних этапах развития фиксируется взбросовое поле напряжений, которое уверенно проявлено на западе Южного Сахалина и вблизи отдельных разломов этой части острова. Отмечено, что сбросовые неотектонические напряжения тяготеют к областям новейших прогибов вдоль западного и восточного побережья острова. Предложенная схема новейшей геодинамики, сопоставленная с результатами реконструкции современных напряжений, показала, что не существует резкого различия в новейшем и современном напряженном состоянии между Западным и Восточным Сахалином, которое должно следовать из-за разного направления перемещения Амурской и Охотской плит [Savostin et al., 1982; Golozubov et al., 2012]. Это свидетельствует о том, что Центрально-Сахалинский разлом не может маркировать границу между Амурской и Охотской плитами на Южном Сахалине. GPS-скорости горизонтальных деформаций земной поверхности о. Сахалин относительно Евразийской литосферной плиты [Vasilenko, Prytkov, 2012] не показывают различия в направлении современных движений западной и восточной части Южного Сахалина, хотя на Северном Сахалине они весьма отличаются как по величинам, так и по направлениям. Проведенное указанными авторами моделирование взаимодействия литосферных плит на о. Сахалин по данным GPS-наблюдений на юге острова показало наилучшее согласование измеренных и модельных скоростей для границы плит, представленной двумя разломами: Центрально-Сахалинским и Западно-Сахалинским. Согласно [Kozhurin, 2013], Центрально-Сахалинский разлом является ветвью Западно-Сахалинского разлома, а по геофизическим данным, он не проявляется как глубинный [Filonenko, Pavlenkova, 2006]. Увеличенная сейсмическая активность на Западном Сахалине дает основание предполагать границу между Амурской и Охотской плитами на Южном Сахалине по Западно-Сахалинскому разлому. На Центральном и Северном Сахалине установленные нами границы геодинамических областей в целом допускают проведение границы между Амурской и Охотской плитами, предложенной в работе [Savostin et al., 1982].

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.А. Паровышному, В.М. Граннику за продуктивные консультации по геологическому строению Сахалина, П.А. Каменеву – за помощь в проведении полевых работ, Р.Э. Татевосяну и Ю.В. Габсатарову – за предоставленные материалы по сейсмичности.

## 8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bulgakov R.F., Ivashchenko A.I., Kim Ch.U., Sergeev K.F., Strel'tsov M.I., Kozhurin A.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Suzuki Y., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y., 2002. Active faults in northeastern Sakhalin. *Geotectonics* 36 (3), 227–246.
- Danilovich V.N., 1961. The Method of Belts in Studies of Fracturing Associated with Shearing. Irkutsk Polytechnic Institute, Irkutsk, 47 p. (in Russian) [Данилович В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. Иркутск: Иркутский политехнический институт, 1961. 47 с.].
- Filonenko V.P., Pavlenkova G.A., 2006. Some features of the dynamics of the crust in the Okhotsk Sea region. In: L.N. Solodilov (Ed.), *Geophysics of the XXI century: 2005: Proceedings of the V.V. Fedynsky seventh geophysical readings*. Nauchny Mir, Moscow, p. 101–107 (in Russian) [Филоненко В.П., Павленкова Г.А. Некоторые особенности динамики земной коры Охотоморского региона // Геофизика XXI столетия: 2005: Сборник трудов Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского / Ред. Л.Н. Солодилов. М.: Научный мир, 2006. С. 101–107].
- Gatinsky Yu.G., Rundquist D.V., 2004. Geodynamics of Eurasia: Plate tectonics and block tectonics. *Geotectonics* 38 (1), 1–16.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1134/S0016852112050020>.
- Grachev A.F. (Ed.), 1998. Recent Neotectonics of Northern Eurasia. Explanatory Note to the Map of Recent Neotectonics of Northern Eurasia, scale of 1:5000000. GEOS, Moscow, 147 p. (in Russian) [Новейшая тектоника Северной Евразии: Объяснительная записка к карте новейшей тектоники Северной Евразии масштаба 1:5000000 / Ред. А.Ф. Грачев. М.: ГЕОС, 1998. 147 с.].
- Grannik V.M., 2008. Geology and Geodynamics of the Southern Okhotsk Sea Region in the Mesozoic and Cenozoic. *Dal'nauka, Vladivostok*, 297 p. (in Russian) [Гранник В.М. Геология и геодинамика южной части Охотоморского региона в мезозое и кайнозое. Владивосток: Дальнаука, 2008. 297 с.].
- Grannik V.M., 2011. Hokkaido-Sakhalin folded area: its geological structure and development. In: *Current state of Earth Sciences. Proceedings of the international conference dedicated to the memory of V.E. Khain (1–4 February 2011, Moscow)*. Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Moscow, p. 494–498 (in Russian) [Гранник В.М. Хоккайдо-Сахалинская складчатая область: геологическое строение и развитие // Современное состояние наук о Земле: Материалы международной конференции, посвященной памяти В.Е. Хаина (г. Москва, 1–4 февраля 2011 г.). М.: Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. С. 494–498].
- 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].
- Gzovsky M.V., 1975. *Fundamentals of Tectonophysics*. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].
- Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M., 2000. *Seismotectonics of Yakutia*. GEOS, Moscow, 226 p. (in Russian) [Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 226 с.].
- Ismail-Zadeh A., Honda S., Tsepelev I., 2013. Linking mantle upwelling with the lithosphere decent and the Japan Sea evolution: a hypothesis. *Scientific Reports* 3, 1137. <http://dx.doi.org/10.1038/srep01137>.
- Kharakhin V.V., 2010. *Petroleum Geology of the Sakhalin Region*. Nauchny Mir, Moscow, 275 p. (in Russian) [Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 275 с.].
- Kharakhin V.V., Gal'tsev-Bezyuk S.D., Tereshchenkov A.A., 1984. Faults of Sakhalin Island. *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* (2), 77–87 (in Russian) [Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терещенков А.А. Разломы Сахалина // Тихоокеанская геология. 1984. № 2. С. 77–87].
- Kononov A.V., Nagornyykh T.V., Safonov D.A., 2014. Recent Study of Earthquake Source Mechanisms in Sakhalin. *Dal'nauka, Vladivostok*, 252 p. (in Russian) [Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.].
- Korchuganova N.I., Kostenko N.P., Mezhelovsky N.N., 2001. *Neotectonic Methods of Mineral Exploration*. RF MNR, Geokart, MGGA, Moscow, 212 p. (in Russian) [Корчуганова Н.И., Костенко Н.П. Межеловский Н.Н. Неотектонические методы поисков полезных ископаемых. М.: МПР РФ, Геокарт, МГГА, 2001. 212 с.].
- Kozhurin A.I., 2013. Active Geodynamics of the Northwestern Sector of the Pacific Tectonic Belt (According to the Study of Active Faults). Abstract of the PhD Thesis (Geology and Mineralogy). Geological Institute RAS, Moscow, 46 p. (in Russian) [Кожурин А.И. Активная геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского тектонического пояса (по данным изучения активных разломов): Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 2013. 46 с.].
- Kuchai V.K., 1987. Modern orogenic structure of the Southern Sakhalin. *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* (1), 50–57 (in Russian) [Кучай В.К. Современная орогенная структура южной части о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 1987. № 1. С. 50–57].

- Levin B.W., Tikhonov I.N. (Eds.), 2009. The 2 August, 2007 Nevelsk Earthquake and Tsunami, Sakhalin Island. Yanus-K, Moscow, 204 p. (in Russian) [Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / Ред. Б.В. Левин, И.Н. Тихонов. М.: Янус-К, 2009. 204 с.].
- Nikolaev P.N., 1992. Method of Tectono-Dynamic Analysis. Nedra, Moscow, 263 p. (in Russian) [Николаев П.Н. Методика тектоно-динамического анализа. М.: Недра, 1992. 263 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].
- Rebetsky Yu.L., 1999. Methods for reconstructing tectonic stresses and seismotectonic deformations based on the modern theory of plasticity. *Doklady Earth Sciences* 365A (3), 370–373.
- Rebetsky Yu.L., 2007. Tectonic Stresses and Strength of Mountain Ranges. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.].
- Rogozhin E.A., 1996. Focal mechanism of the Neftegorsk, Sakhalin earthquake of May 27 (28), 1995. *Geotectonics* 30 (2), 124–131.
- Rogozhin E.A., 2012. Essays in Regional Seismotectonics. IPE RAS, Moscow, 340 p. (in Russian) [Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмотектоники. М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.].
- Rogozhin E.A., Reisner G.I., Besstrashnov V.M., Strom A.L., Borisenko L.S., 2002. Seismotectonic settings of Sakhalin Island. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 38 (3), 207–214.
- Rozhdestvensky V.S., 1969. Strike-slip faults in the East Sakhalin mountains. *Doklady AN SSSR* 187 (1), 156–159 (in Russian) [Рождественский В.С. Сдвиги Восточно-Сахалинских гор // Доклады АН СССР. 1969. Т. 187. № 1. С. 156–159].
- Rozhdestvensky V.S., 1987. Tectonic evolution of the Sakhalin island. *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* (3), 42–51 (in Russian) [Рождественский В.С. Тектоническое развитие о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 1987. № 3. С. 42–51].
- Rozhdestvensky V.S., 1997. The role of strike-slip faults in the formation of the structure of Sakhalin, hydrocarbon deposits and mineralized zones. In: B.N. Piskunov (Ed.), Geology and Geodynamics of the Sikhote-Alin and Hokkaido-Sakhalin Folded Regions. IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, p. 80–109 (in Russian) [Рождественский В.С. Роль сдвигов в формировании структуры Сахалина, месторождений углеводородов и рудоносных зон // Геология и геодинамика Сихотэ-Алинской и Хоккайдо-Сахалинской складчатых областей / Ред. Б.Н. Пискунов. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. С. 80–109].
- Savostin L.A., Verzhbitskaya A.I., Baranov B.V., 1982. Modern tectonics of the Okhotsk Sea region. *Doklady AN SSSR* 266 (4), 961–965 (in Russian) [Савостин Л.А., Вержбицкая А.И., Баранов Б.В. Современная тектоника Охотоморского региона // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266. № 4. С. 961–965].
- Seno T., Sakurai T., Stein S., 1996. Can the Okhotsk Plate be discriminated from the North American plate? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 101 (B5), 11305–11315. <http://dx.doi.org/10.1029/96JB00532>.
- Sim L.A., 1982. Determination of the regional field from the data on local stresses on separate sites // *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., 2000. Impact of global tectogenesis on the most recent state of stresses in platforms in Europe. In: M.V. Gzovsky and the 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. М.: Наука, 2000. С. 326–350].
- 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. <http://dx.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]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2011-2-3-0044>.
- Soloviev S.L., Oskorbin L.S., Ferchev M.D., 1967. Earthquakes on Sakhalin. Nauka, Moscow, 178 p. (in Russian) [Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С., Ферчев М.Д. Землетрясения на Сахалине. М.: Наука, 1967. 178 с.].
- Tataurova A.A., 2015. Stress and strain fields based on data on crustal earthquake mechanisms in Sakhalin Island. *Bulletin of Kamchatka Regional Association Education–Science Centre. Earth Sciences* (3), 93–101 (in Russian) [Татаурова А.А. Поля напряжений и деформаций по данным механизмов коровых землетрясений о. Сахалин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 3. С. 93–101].
- Vasilenko N.F., Prytkov A.S., 2012. GPS-based modeling of the interaction between the lithospheric plates in Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology* 6 (1), 35–41. <http://dx.doi.org/10.1134/S1819714012010137>.

Voeikova O.A., Nesmeyanov S.A., Serebryakova L.I., 2007. Neotectonics and Active Faults of Sakhalin. Nauka, Moscow, 187 p. (in Russian) [Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разломы Сахалина. М.: Наука, 2007. 187 с.].

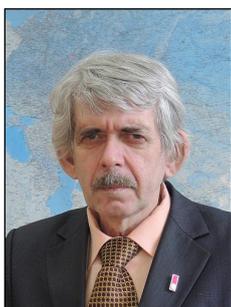
Zharov A.E., 2004. Geological Structure and Cretaceous-Paleogene Geodynamics of South-East Sakhalin. Sakhalin Publishing House, Yuzhno-Sakhalinsk, 191 p. (in Russian) [Жаров А.Е. Геологическое строение и мел-палеогеновая геодинамика Юго-Восточного Сахалина. Южно-Сахалинск: Сахалинское кн. изд-во, 2004. 191 с.].

Zlobin T.K., 2005. Dynamics of the Seismic Process and the Structure of Focal Zones of Strong Earthquakes in Sakhalin and the Kuriles. Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, 141 p. (in Russian) [Злобин Т.К. Динамика сейсмического процесса и строение очаговых зон сильных землетрясений Сахалина и Курил. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2005. 141 с.].



**Сим Лидия Андреевна**, 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](mailto:sim@ifz.ru)

**Sim, Lidia A.**, 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  
✉ e-mail: [sim@ifz.ru](mailto:sim@ifz.ru)



**Богомолов Леонид Михайлович**, докт. физ.-мат. наук, директор  
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН  
693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, Россия  
e-mail: [bogomolov@imgg.ru](mailto:bogomolov@imgg.ru)

**Bogomolov, Leonid M.**, Doctor of Physics and Mathematics, Director  
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS  
1B Nauka street, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia  
e-mail: [bogomolov@imgg.ru](mailto:bogomolov@imgg.ru)



**Брянцева Галина Владимировна**, 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](mailto:bryan.bryan@yandex.ru)

**Bryantseva, Galina V.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Assistant Professor  
M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology  
1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia  
e-mail: [bryan.bryan@yandex.ru](mailto:bryan.bryan@yandex.ru)



**Саввичев Павел Александрович**, ведущий инженер  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия  
e-mail: [psavvichev@gmail.com](mailto:psavvichev@gmail.com)

**Savvichev, Pavel A.**, Lead Engineer  
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS  
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia  
e-mail: [psavvichev@gmail.com](mailto:psavvichev@gmail.com)