УДК 551.248.2 DOI: 10.31431/1816-5524-2021-4-52-73-88

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОЛУОСТРОВЕ ШМИДТА (САХАЛИН)

© 2021 А.В. Маринин[1], Ю.Л. Ребецкий[1], Л.А. Сим[1], П.А. Каменев[2], Ю.В. Костров[3], И.В. Бондарь[1], Н.А. Гордеев[1], В.А. Дегтярев[2, 3]

[1]Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия, 123242; e-mail: marinin@ifz.ru
[2]Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия, 693022
[3]ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», Южно-Сахалинск, Россия, 693000

В статье представлены данные о напряженном состоянии п-ва Шмидта острова Сахалин, полученные в результате полевых тектонофизических исследований в 2020 г. Важность изучения северной части Сахалина обусловлена перспективностью этого региона для поиска полезных ископаемых и особенно месторождений нефти. Выполненные исследования позволили установить различия геодинамической обстановки между западным и восточным побережьем п-ва. В целом, на изученной территории среди типов напряженного состояния преобладают обстановки горизонтального сдвига (сдвиговый тип деформирования). На восточном побережье много обстановок горизонтального растяжения. которые как правило приурочены к приосевым частям антиклинальных структур. Для западного побережья характерна устойчивая ориентировка оси максимального сжатия в СЗ направлении и ее субгоризонтальное положение. Для восточного побережья направление реконструированных направлений максимального сжатия характеризуется большей изменчивостью. По данным проведенной реконструкции характер напряженно-деформированного состояния п-ва Шмидта на неотектоническом этапе имеет существенные отличия от основной территории острова Сахалин.

Ключевые слова: тектонические напряжения, деформации, зеркала скольжения, трещиноватость, остров Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Шмидта представляет северное окончание острова Сахалин, который в свою очередь входит в Хоккайдо-Сахалинскую складчатую область. Район характеризуется высокой неотектонической активностью и представляет собой новейшее поднятие, в пределах которого выделяются три основные структуры: Эспенбергская антиклинальная зона (Западный хребет). Диановская синклинальная зона и Трехбратская антиклинальная зона (Восточный хребет). Выделяемые здесь крупные разрывные нарушения (Хейтонский и Лонгрийский разрывы) входят в состав Северо-Сахалинской сдвиговой зоны (Рождественский, 1982), имеющей в целом меридиональное простирание. Хейтонский и Лонгрийский разрывы имеют ССЗ простирание и являются для восточного берега главными разрывными структурами района исследования. На современном этапе по данным (Кожурин и др., 2009; Kozhurin, 2004) они имеют правосдвиговую кинематику. Ранее В.С. Рождественским (Рождественский, 1979; 1982; 2008) общая правосдвиговая амплитуда смещений по контакту меловых и кайнозойских отложений оценивалась в 10–15 км. Активность их подтверждается выраженностью в рельефе и палеосейсмологическими данными (Кожурин и др., 2009).

Целью наших исследований была реконструкция тектонических напряжений по данным разнообразных геологических индикаторов напряжений/деформаций. Некоторые предварительные (наиболее общие) результаты рассмотрены в недавних работах (Каменев и др., 2021; Костров и др., 2021). В настоящей статье основным источником данных являлись зеркала скольжения на поверхностях тектонических трещин и небольших разрывов, которые несут достоверную информацию о кинематике смещений и, как правило, характеризуют последний этап деформирования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При полевых исследованиях и последующих реконструкциях напряженно-деформированного состояния задействованы структурно-парагенетический метод анализа малых дизъюнктивов (Расцветаев, 1987) и метод катакластического анализа разрывных смещений (Ребецкий, 2003; Ребецкий и др., 2017).

В основу метода структурно-парагенетического анализа тектонической трещиноватости положено представление о квазипластическом деформировании массива горных пород, обуславливающем энергетическую эффективность смещений по ранее образованным нарушениям. Метод предполагает использование всех основных типов геологических индикаторов напряжений, характеризующих единый пространственно-временной ряд квазипластического деформирования массива горных пород. Тесно связанные временными и пространственными характеристиками геологические индикаторы напряжений образуют часто повторяющиеся структурные рисунки и могут быть объединены в парагенетические ассоциации или структурные парагенезисы (парагенезы). Основной анализ при камеральной обработке выполняется на структурных диаграммах, построенных по данным собранным как в отдельных точках наблюдения, так и по группам точек, в которых проводился сбор структурно-геологической информации.

Для обработки замеров трещин и зеркал скольжения с установленным характером смещений использовался метод катакластического анализа разрывных смещений (Ребецкий, 2003, 2007) и созданная на его основе компьютерная программа *STRESSgeol* (Ребецкий, 2007; Ребецкий и др., 2017). Метод позволяет определить количественные характеристики реконструируемых локальных стресс-состояний, таких как положение осей главных напряжений, тип напряженного состояния, коэффициент Лоде – Надаи, а также величины самих напряжений. 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. Применяемая для расчетов программа *STRESSgeol* использует автоматизированный итерационный алгоритм разделения сколов на однородные выборки, определяющие временные фазы квазиоднородного деформирования макрообъема, для достижения максимальности суммарной энергии диссипации при минимальном количестве выделяемых фаз.

ДАННЫЕ ПОЛЕВЫХ СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

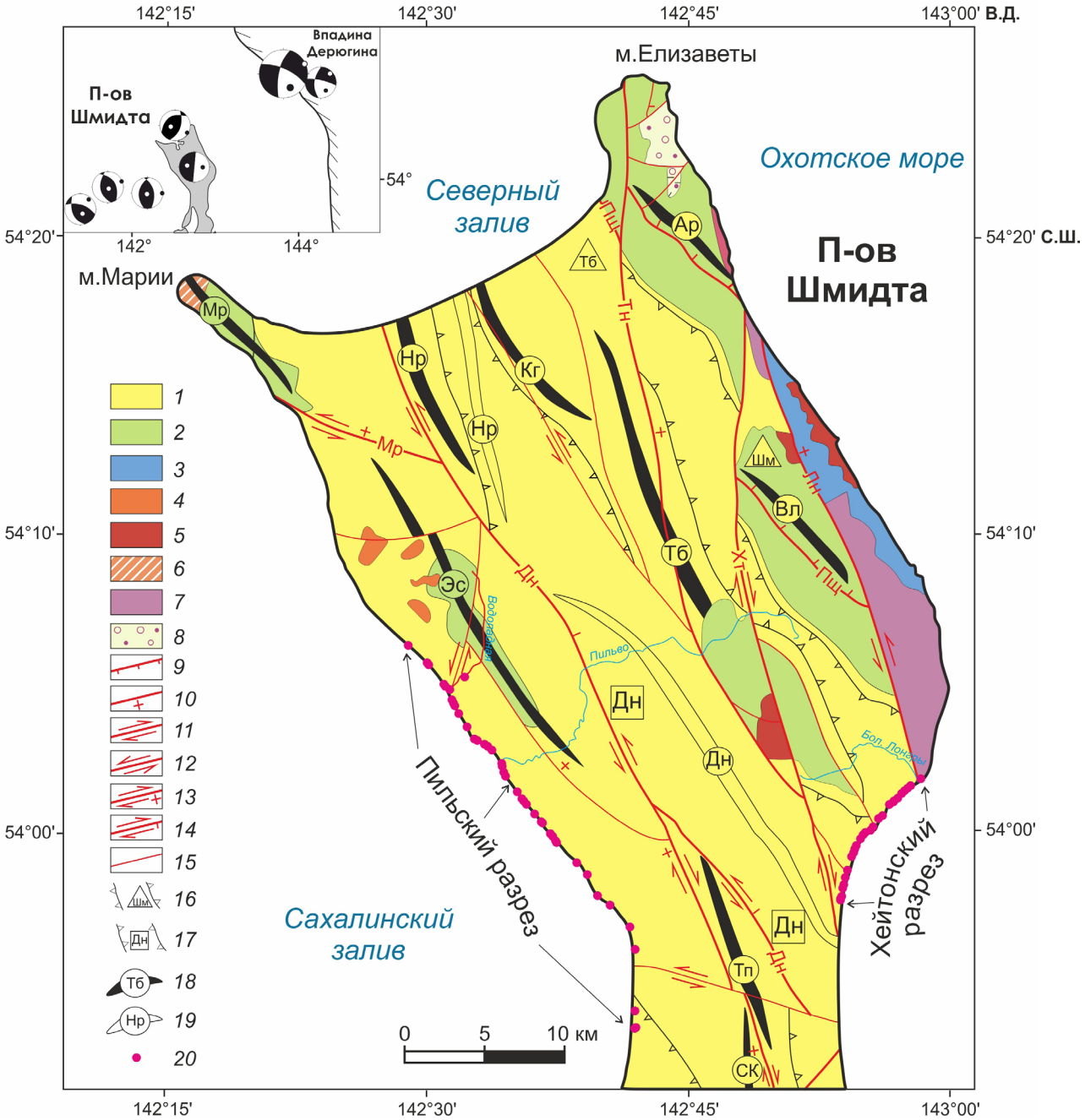
Полевое изучение индикаторов тектонических напряжений проводилось на западном (Пильский разрез) и на восточном (Хейтонский разрез) побережьях п-ва Шмидта (рис. 1). Геологическое строение этих опорных разрезов подробно описано в многочисленных публикациях и монографиях (Гладенков и др., 2002; Кожурин

Рис. 1. Тектоническая схема района исследования, составленная с учетом данных (Государственная..., 2009): *1–3* — структурные этажи: *1* — эоцен-нижнеплиоценовый, *2* — меловой, *3* — юрско-нижнемеловой; *4–5* — интрузивные образования: *4* — миоценовые, *5* — позднемеловые; субщелочные субвулканические образования; *6* — раннемеловые; *7–8* — плутонические комплексы предположительно раннемезозойской офиолитовой ассоциации: *7* — гипербазиты, *8* — палеогеновый полимиктовый серпентинитовый меланж; *9–15* — разрывные нарушения: *9* — надвиги (Пщ — Пещерный), *10* — взбросы, *11* — правые сдвиги (Хт — Хейтонский), *12* — левые сдвиги, *13* — взбросо-сдвиги (Лн — Лонгрийский, Мр — Марийский, Тн — Туинский); *14* — сбросо-сдвиги (Дн — Дионовский), *15* — неустановленной кинематики; *16* — антиклинальные зоны (Тр — Трехбратская, Шм — Шмидтовская); *17* — синклинальные зоны (Дн — Дионовская); *18* — антиклинали (Ар — Аэродромовская, Вл — Валовская, Кг — Куэгдинская, Мр — Марийская, Нр — Неуртинская, Тб — Трехбратская, Тп — Троптунская, СК — Северо-Колендинская; Эс — Эспенбергская); *19* — синклинали (Дн — Дионовская, Нр — Неуртинская); *20* — точки наблюдения. На врезке: схема механизмов очагов коровых землетрясений между п-вом Шмидта и впадиной Дерюгина, составленная по данным (Коновалов и др., 2014).

Fig. 1. Tectonic scheme of the study area based on data (State..., 2009): *1–3* — structural units: *1* — Eocene-Lower Pliocene, *2* — Cretaceous, *3* — Jurassic-Lower Cretaceous; *4–5* — intrusive formations: *4* — Miocene, *5* — Late Cretaceous; subalkalic subvolcanic formations: *6* — Early Cretaceous; *7–8* — plutonic complexes of presumably Early Mesozoic ophiolite association: *7* — hyperbasites, *8* — Paleogene polymictic serpentinite melange; *9–15* — structural discontinuities: *9* — thrusts (Пщ — Pescherny), *10* — reverse faults, *11* — dextral strike-slip faults (Хт — Heytonsky), *12* — sinistral strike-slip faults, *13* — thrusts with strike-slip component (Лн — Longri, Мр — Mari, Тн — Tuinsky), *14* — normal faults with strike-slip component, *15* — unidentified kinematics; *16* — anticline zones (Тр —Trekhbratskaya, Шм — Schmidt); *17* — syncline zones (Дн — Dianovskaya); *18* — anticlines (Ар-Aerodromovskaya, Вл-Valovskaya, Кг-Kuegdinskaya, Мр — Mariyskaya, Нр-Neurtinskaya, Тб — Trekhbratskaya, Тп — Troptunskaya, СК — Severo-Kolendinskaya; Эс — Espenberg); *19* — synclines (Дн — Dianovskaya, Нр — Neurtinskaya); *20* — observation points, Inset: a diagram of the mechanisms of crustal earthquake between the Schmidt Peninsula and the Deryugin depression, compiled from data (Konovalov et al., 2014).

и др., 2009; Рождественский, 1979; 1982; 2008 и др.). Молодые неогеновые разрезы п-ва Шмидта оказались довольно информативными для сбора структурно-геологических данных. В структурно-геологическом отношении Пильский и Хейтонский разрезы отличаются, прежде всего, по широкому развитию на восточном побережье складчатых деформаций, которые на западном берегу имеют минимальное проявление. Если на восточном побережье при полевом изучении фиксируются складчатые структуры с размахом крыльев от нескольких метров до сотен метров, то на западном наблюдаются лишь малоамплитудные флексуры и небольшие осложнения в целом выдержанного наклонного залегания слоев. Также необходимо отметить, что на западном побережье точки наблюдения расположены вдоль региональных разломов ССЗ простирания, а на восточном побережье полоса точек наблюдения ориентирована практически ортогонально Хейтонскому и Лонгрийскому разрывам (рис. 1).

В результате наших полевых исследований практически во всех точках собраны достоверные данные по разным типам геологических индикаторов напряжений/деформаций. Наиболее широко развиты трещины без видимых следов смещений. Наблюдаются отрывные трещины с минерализацией в виде минеральных корочек, кристаллов и щеток, а также без минерализации. Особое внимание уделялось сбору данных по зеркалам скольжения и небольшим разрывам, по которым проводилась реконструкция тектонических



напряжений. Всего сделано > 3700 измерений различных структур хрупкого разрушения, из них со структурно-кинематической информацией > 900. В ряде точек наблюдения удалось зафиксировать смещение одних геологических стресс-индикаторов другими дизъюнктивными нарушениями, что позволило определить относительную последовательность формирования структур.

В настоящей статье мы сделали акцент на интерпретацию собранных нами данных о зеркалах скольжения, по которым возможно определение кинематического типа относительного смещения бортов нарушения. В некоторых случаях определения кинематического типа были подкреплены определением амплитуды смещения или ее компоненты. Среди изученных зеркал скольжения преобладают сдвиговые нарушения (смещение преимущественно по простиранию — сдвиги в геологическом смысле слова, правые и левые), что подтверждает правомерность результатов, полученных ранее в исследуемом регионе при проведении работ с применением структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений (Сим и др., 2017 (1, 2)). Меньшее количество зеркал скольжения относится к взбросово-надвиговому или сбросовому типу. Причем, если на западном побережье (Пильский разрез) преобладают взбросово-надвиговые дизъюнктивы (89 против 55), то на восточном начинают преобладать сбросовые нарушения (106 измерений против 56). По результатам реконструкции это нашло отражение в распределение типов напряженного состояния (большое количество обстановок горизонтального сжатия на западе и обстановок горизонтального растяжения на востоке п-ва Шмидта).

Типичные структурные парагенезы на диаграммах Пильского разреза представлены зеркалами скольжения с право- и левосдвиговой кинематикой (рис. 2, диаграммы 20767k и 20767m). Особенностью являются их расположение ближе к области компакционных структур на диаграммах Мора (Ребецкий и др., 2017). Часто в одной точке наблюдения локализуются сдвиги одной кинематики (только правые или только левые). В ряде точек наблюдается преобладание взбросовых и надвиговых зеркал скольжения (например, диаграмма 20293k по району р. Пильво на рис. 2). На Хейтонском разрезе типичный структурный парагенез также представлен зеркалами скольжения со сдвиговой кинематикой (рис. 2, диаграмма 20330). В северной части исследованного района (массив Левенштерна) отмечен парагенез сбросово-отрывных структур (рис. 2, диаграмма 20816m).

Распределение зеркал скольжения разных кинематических типов на общих диаграммах более «сглаженное» чем на диаграммах по «локальным» точкам наблюдения, на которых вырисовываются четкие области распределения левых и правых сдвигов, взбросо-надвиговых и сбросовых зеркал скольжения (рис. 3, 4). Такое распределение на объединенных диаграммах обусловлено, по нашему мнению, использованием систем трещиноватости как ослабленных плоскостей для реализации более поздних подвижек с формированием зеркал скольжения (из-за чего данные направления используют разнонаправленные нарушения при вариации напряженного состояния как по латерали, так и по времени). Вместе с тем на общих диаграммах вырисовываются и отличия в тектодинамической обстановке районов. Можно отметить, что взбросовые максимумы на Пильском разрезе имеют СВ простирание (от СВ до широтного), а на Хейтонском помимо аналогичного максимума присутствуют взбросы СЗ простирания. Для Хейтонского разреза хорошо проявлены максимумы сбросов и правых сдвигов меридионального (до ССЗ) простирания, которые соответствуют простиранию региональных разломов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Для Пильского разреза в 31 точке наблюдения удалось реконструировать основные параметры локальных стресс-состояний (ориентация осей главных напряжений, коэффициент Лоде – Надаи, тип напряженного состояния и др.). В пределах Хейтонского разреза основные параметры локальных стресс-состояний определены в 33 точках наблюдения. При этом в некоторых точках на разных частях одного обнажения разными геологами определены близкие или несколько различающиеся параметры локальных стресс состояний.

В наших исследованиях правило знаков для нормальных напряжений принято в соответствии с положениями механики сплошной среды, т.е. растяжение положительное, а сжатие отрицательное (Ребецкий и др., 2017). Это отличается от правила знаков, принятого в горном деле (Каспарьян и др., 2006). Поэтому, в этой работе напряжения наибольшего сжатия обозначаются как σ_3, а наименьшего сжатия или наибольшего растяжения — как σ_1 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

Основная часть замеров проведена в молодых миоценовых отложениях, что позволяет сопоставлять полученные данные реконструкции тектонических напряжений с неотектоническими структурами северной части острова Сахалин. В процессе полевых работ определено относительное хронологическое положение этапа деформирования, соответствующего

времени формирования зеркал скольжения на основе взаимопересечений с другими малыми структурами. В большинстве случаев зеркала скольжения формировались позже основных систем тектонической трещиноватости (протяженных трещин, формирующихся на поздних стадиях литогенеза) и песчаных даек. Песчаные дайки имеют до 2–3 генераций внедрения, что также устанавливается по пересечению ранее сформированных даек более поздними дайками. Часто зеркала скольжения находятся в структурном парагенезе с отрывными трещинами с минерализацией. Некоторые трещины, отрывы и зоны дробления смещают плоскости зеркал скольжения, т.е. формировались еще позднее.

По результатам определения локальных стресс-состояний составлены сводные таблицы (табл. 1, 2), построены карты ориентировок

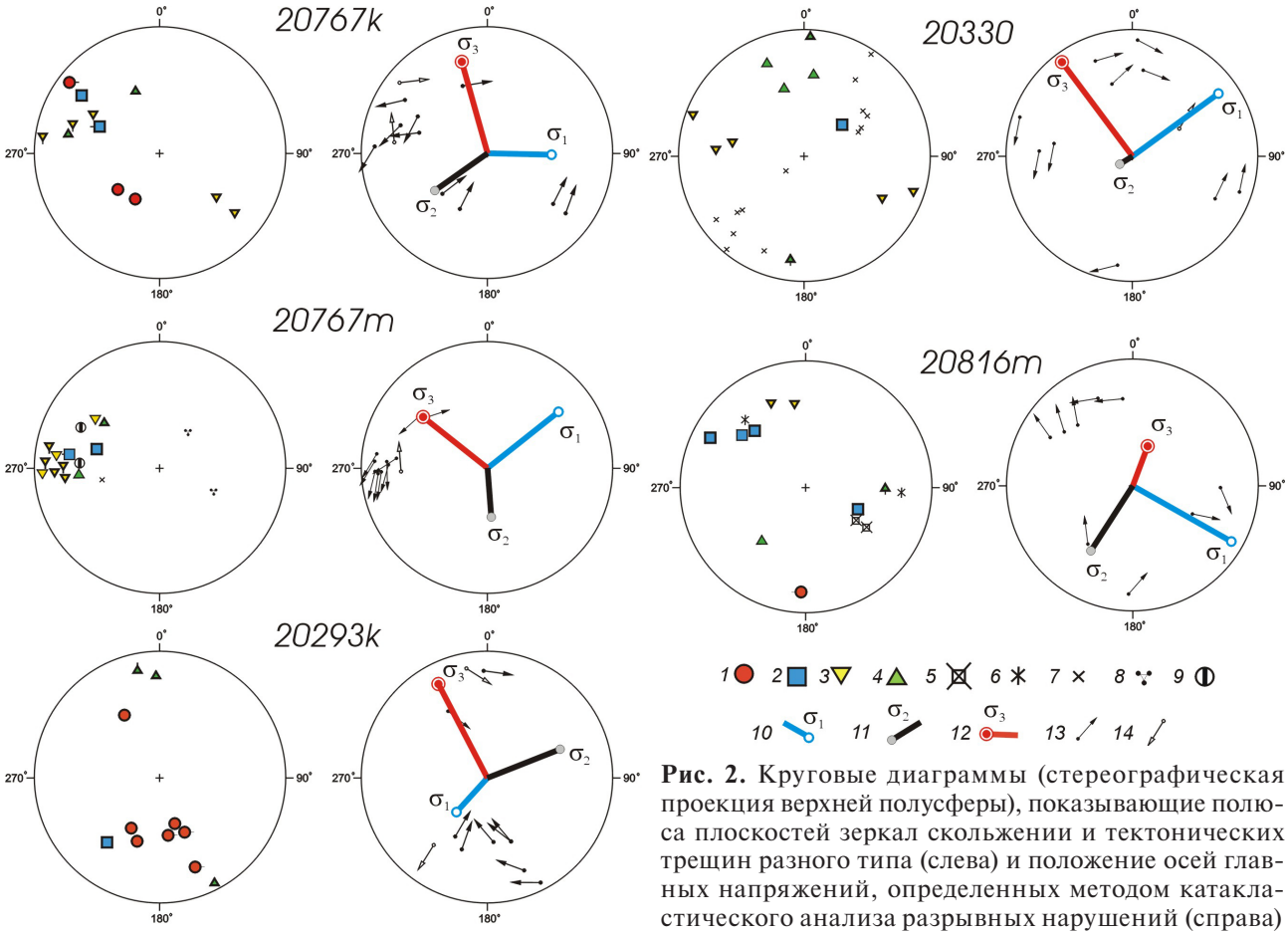


Рис. 2. Круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показывающие полюса плоскостей зеркал скольжении и тектонических трещин разного типа (слева) и положение осей главных напряжений, определенных методом катакластического анализа разрывных нарушений (справа) в т.н. 20767k, 20767m (вблизи р. Водопадная), 20293 (р. Пильво), 20330 (Хейтонский разрез), 20816 (севернее р. Бол. Лонгри): *1–8* — полюса тектонических трещин с преимущественным типом перемещений: *1* — взбросы, *2* — сбросы, *3* — левые сдвиги, *4* — правые сдвиги, *5* — отрывы, *6* — жилы, *7* — элементы залегания слоистости, *8* — система тектонических трещин; *9* — песчаные дайки; *10–12* — оси главных нормальных напряжений: *10* — минимальных, *11*—промежуточных, *12* — максимальных; *13–14* — направление перемещения висячего блока в полюсах трещин (зеркал скольжения) со структурно-кинематическими данными, *13* — использованы при реконструкции, *14* — не использованы при реконструкции. Полюса плоскостей зеркал скольжения с высокой степенью достоверности определения кинематики относительного смещения отмечены толстой линией по краям значка, а для замеров со значительной взбросовой, сбросовой, право- или левосдвиговой компонентой — бергштрихом в соответствующем направлении (для значков №№ 1–4).

Fig. 2. The stereoplots (stereographic projection of the upper hemisphere) showing the poles of slickenside planes and tectonic joints of different types (left) and the position of the principal stress axes determined by cataclastic analysis of structural discontinuities (right) at the observation points 20767k, 20767m (near the Vodopadnaya River), 20293 (Pilvo River), 20330 (Kheyton section), 20816 (north of Bol. Longri River): *1–8* — poles of tectonic joints with predominant type of displacement: *1* — thrusts, *2* — normal faults, *3* — sinistral strike-slips, *4* — dextral strike-slips, *5* — tension gash, *6* — veins, *7* — bedding planes, *8* — system of tectonic joints; *9* — sand dikes; *10–12* — axes of principal stress: *10* — minimum, *11* — intermediate, *12* — maximum; *13–14* —direction of movement of the hanging block in the poles of joints (slickensides) with structural and kinematic data, *13* — used in reconstruction, *14* — not used in reconstruction. Measurements with a high degree of reliability in determining the kinematics of relative displacement are marked with a thick line along the edges of the icon, and for measurements with a significant reverse, normal, and strike-slip (either dextral or sinistral) components — with bergstroke in the appropriate direction (for icons №№ 1–4).

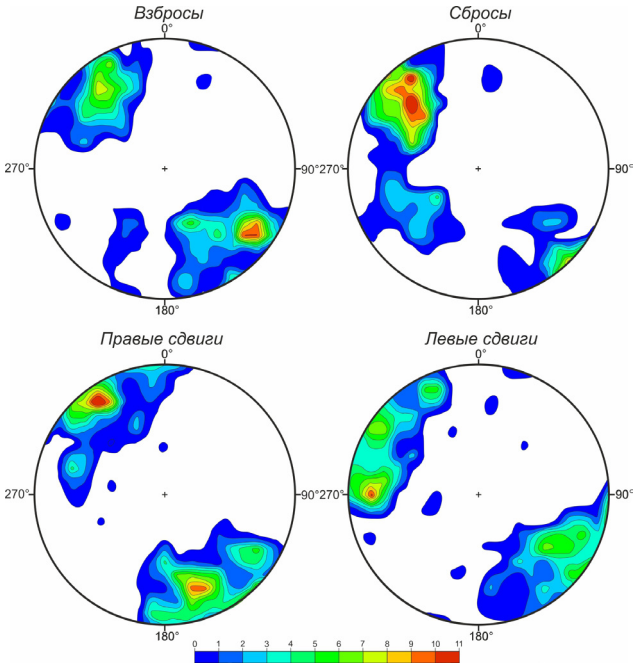


Рис. 3. Плотностное распределение полюсов плоскостей зеркал скольжения разных кинематических типов, измеренных в пределах Пильского разреза (стереографическая проекция верхней полусферы, шкала с изолиниями плотности полюсов).

Fig. 3. Density distribution of the poles of slickenside planes of different kinematic types measured within the Pilskiy section (stereographic projection on the upper hemisphere, scale with isolines of pole density).

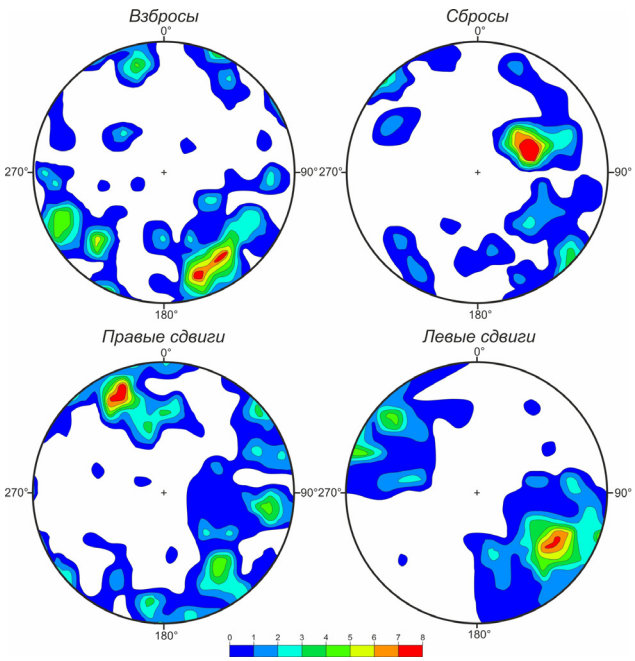


Рис. 4. Плотностное распределение полюсов плоскостей зеркал скольжения разных кинематических типов, измеренных в пределах Хейтонского разреза (стереографическая проекция на верхнюю полусферу, шкала с изолиниями плотности полюсов).

Fig. 4. Density distribution of the poles of slickenside planes of different kinematic types measured within the Kheyton section (stereographic projection on the upper hemisphere, scale with isolines of pole density).

осей главных напряжений (рис. 5, 6). круговые диаграммы выходов осей главных напряжений (рис. 7, 8) и карты типов напряженного состояния реконструированных локальных стресс-состояний (рис. 9, 10).

Ориентировка осей главных напряжений. Данные проведенной реконструкции показывают, что на западном и восточном побережьях п-ва Шмидта встречаются разные типы напряженного состояния и есть некоторые вариации направлений главных напряжений. При взгляде на карты с проекциями осей, направленных по их погружению (рис. 5, 6), в положении осей главных напряжений в пределах Пильского разреза видно, в целом, пологое СЗ-ЮВ положение осей максимального сжатия. Оси растяжения в северной части около р. Водопадная направлены ортогонально берегу (простирание ЮЗ-СВ), а в южной части часто имеют субвертикальное положение. Оси σ_2 образуют обратную картину — в северной части они субвертикальны, а на юге вблизи устья р. Пильво имеют ЮЗ-СВ направление.

На восточном побережье п-ва Шмидта ориентировки осей максимального сжатия разнообразнее. Преобладает СЗ-ЮВ положение осей, довольно много меридиональных и СВ направлений, а также вертикальных положений. Сходную ориентировку имеют и промежуточные оси (σ_2). Оси девиаторного растяжения вытянуты в ВСВ направлении.

При статистической обработке на стереограммах выделяются четкие плотностные максимумы распределения выходов осей (рис. 7, 8). Рассмотрим, как группируются оси главных напряжений для всех реконструированных локальных стресс-состояний Пильского разреза (рис. 7). Оси главного девиаторного растяжения (далее оси растяжения) образуют максимум с СВ направлением (вариации от меридионального до широтного). Углы наклона большинства реконструированных осей растяжения близки к горизонтальным, а при восточных погружениях составляют ~45°. Близкие максимумы и для осей промежуточных главных напряжений (σ_2). Для осей максимального сжатия (далее оси сжатия) характерен максимум СЗ направления с субгоризонтальным их положением.

Для Хейтонского разреза оси растяжения образуют более четкий максимум с СВ направлением. Оси главных промежуточных и максимальных сжимающих напряжений имеют «разбросанные» максимумы с СЗ, СВ и субвертикальным положением (рис. 8).

Табл. 1. Параметры палеонапряженного состояния в районе Пильского разреза (западное побережье п-ва Шмидта)

Table 1. Parameters of the paleostress state in the area of the Pilskiy section (west coast of the Schmidt Peninsula)

№	Номер точки	Координаты точек наблюдения		σ_1		σ_2		σ_3		Тип напряженного состояния	μ_σ	Элементы залегания	Количество замеров	
		с.ш.	в.д.	Аз Пд	∠	Аз Пд	∠	Аз Пд	∠				N	N исп.
1	**2**	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	**20277**	54° 05.702'	142° 30.041'	42	37	209	52	307	7	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	0.10		11	10
2	**20769**	54° 04.954'	142° 31.011'	185	11	80	52	283	36	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	0.18	248 ∠ 62	16	10
3	**20272m**	54° 04.894'	142° 31.093'	255	35	72	55	164	2	гориз. сдвиг	0.22	248 ∠ 60	6	4
4	**20272g**	54° 04.887'	142° 31.079'	36	0	126	73	306	17	гориз. сдвиг	-0.05		15	10
5	**20767m**	54° 04.879'	142° 31.106'	231	22	355	54	129	26	гориз. сдвиг	-0.56	258 ∠ 50	11	10
6	**20767k**	54° 04.879'	142° 31.106'	270	42	56	43	163	18	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	-0.08	258 ∠ 50	12	10
7	**20766m**	54° 04.856'	142° 31.123'	277	30	122	58	13	11	гориз. сдвиг	-0.22	248 ∠ 55	12	11
8	**20766k**	54° 04.856'	142° 31.123'	54	6	321	27	155	63	гориз. растяжение	-0.03	248 ∠ 55	8	8
9	**20279**	54° 04.787'	142° 31.196'	171	53	44	24	302	26	гориз. сжатие	0.41	300 ∠ 80	13	6
10	**20281**	54° 04.728'	142° 31.236'	210	6	306	50	115	40	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	0.14	240 ∠ 44	7	4
11	**20280**	54° 04.718'	142° 31.250'	231	22	24	66	137	10	гориз. сдвиг	0.35	230 ∠ 56	7	5
12	**20771**	54° 04.699'	142° 31.240'	212	17	357	69	119	11	гориз. сдвиг	0.21	235 ∠ 44	14	11
13	**20278**	54° 04.695'	142° 31.241'	202	21	39	68	294	6	гориз. сдвиг	0.29	228 ∠ 51	4	3
14	**20812**	54° 04.672'	142° 31.273'	288	6	21	30	189	59	гориз. растяжение	-0.39	228 ∠ 40	8	7
15	**20282**	54° 04.666'	142° 31.280'	62	29	201	54	321	20	гориз. сдвиг	0.12		9	6
16	**20773**	54° 04.625'	142° 31.301'	31	30	200	59	298	5	гориз. сдвиг	0.15	243 ∠ 46	10	10
17	**20774**	54° 04.505'	142° 31.397'	68	34	246	56	338	1	гориз. сдвиг	-0.24	248 ∠ 50	6	6
18	**20775**	54° 04.364'	142° 31.505'	186	17	6	73	276	0	гориз. сдвиг	-0.12	238 ∠ 60	16	10
19	**20287**	54° 04.061'	142° 31.775'	26	77	230	12	138	5	гориз. сжатие	-0.50		7	5
20	**20292**	54° 02.955'	142° 33.447'	174	17	268	13	33	69	гориз. растяжение	0.46	245 ∠ 35	5	3
21	**20291**	54° 02.931'	142° 33.476'	315	82	210	2	120	8	гориз. сжатие	0.22		11	9
22	**20782**	54° 02.927'	142° 33.474'	270	90	234	0	324	0	гориз. сжатие	0.06	240 ∠ 21	24	20
23	**20293k**	54° 02.800'	142° 33.700'	44	66	249	32	152	0	гориз. сжатие	-0.13		11	9
24	**20293g**	54° 02.801'	142° 33.690'	90	78	348	3	258	0	гориз. сжатие	-0.19	239 ∠ 21	10	10
25	**20294**	54° 02.359'	142° 34.245'	109	71	228	10	321	0	гориз. сжатие	0.18	230 ∠ 23	17	11
26	**20295**	54° 02.224'	142° 34.286'	233	11	27	78	142	0	гориз. сдвиг	-0.05	233 ∠ 33	7	6

Табл. 1. Окончание
Table 1. Continued

1	**2**	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
27	**20784**	54° 02.009'	142° 34.399'	307	11	216	2	115	0	гориз. растяжение	-0.21	238 ∠ 35	12	10
28	**20297**	54° 01.988'	142° 34.417'	262	42	49	43	156	0	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	-0.12	216 ∠ 26	12	7
29	**20785**	54° 01.935'	142° 34.455'	338	57	209	22	109	0	гориз. сжатие	0.14	233 ∠ 38	12	11
30	**20789**	54° 00.980'	142° 35.641'	90	36	270	54	0	0	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	0.38		5	4
31	**20791**	54° 00.211'	142° 36.772'	270	48	74	41	171	0	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	0.17	198 ∠ 30	5	4

Примечание. В столбцах указаны номера и координаты точек наблюдения, в которых проведена реконструкция с использованием метода катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий, 2007]; ориентация (азимуты и углы погружения) осей главных напряжений (σ_1 — минимальных (растяжение), σ_2 — промежуточных и σ_3 — максимальных сжимающих напряжений); тип (обстановка) напряженного состояния; коэффициент Лоде – Надаи μ_σ; элементы залегания слоистости (опр. — опрокинутое), общее количество замеров в точке и в том числе использованных для расчета в программе STRESSgeol. Точки, имеющие номера с буквенными индексами, находятся на близком расстоянии (до 20 м) друг от друга и охарактеризованы замерами разных исследователей: А.В. Маринин (m), П.А. Каменев (k), И.В. Бондарь (b), Н.А. Гордеев (g).

Note. The columns indicate the numbers and coordinates of the observation points where stress state is reconstructed using the method of cataclastic analysis [Rebetsky, 2007]; orientation (azimuths and dip angles) of the principal stress axes (σ_1 — minimum (extension), σ_2 — intermediate and σ_3 — maximum compressive stresses); stress regime; tLode – Nadai coefficient μ_σ; bedding plane dips (опр. — overturned); the total number of measurements at the point and of those used for calculation in the STRESSgeol program. The points having numbers with letter indices are close to each other (up to 20 m) nd are characterized by measurements of different researchers: A.V. Marinin (m), P.A. Kamenev (k), I.V. Bondar (b), N.A. Gordeev (g).

Табл. 2. Параметры палеонапряженного состояния в районе Хейтонского разреза (восточное побережье п-ва Шмидта)
Table 2. Parameters of the paleostress state in the area of the Kheyton section (east coast of the Schmidt Peninsula)

№	Номер точки	Координаты точек наблюдения		σ_1		σ_2		σ_3		Тип напряженного состояния	μ_σ	Элементы залегания	Количество замеров	
		с.ш.	в.д.	Аз Пд	∠	Аз Пд	∠	Аз Пд	∠				N	N исп.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	20816m	54° 01.818'	142° 58.375'	300	6	34	32	201	57	гориз. растяжение	-0.46		9	9
2	20816b	54° 01.818'	142° 58.375'	141	16	273	67	46	17	гориз. сдвиг	0.20		18	11
3	20819 и 20820	54° 01.450'	142° 57.457'	264	12	66	78	173	4	гориз. сдвиг	-0.15	68 ∠ 48	11	8
4	20821	54° 01.328'	142° 57.270'	108	6	15	27	209	63	гориз. растяжение	-0.03	13 ∠ 40	11	8
5	20822	54° 01.217'	142° 57.155'	206	77	310	3	41	13	гориз. сжатие	0.12	228 ∠ 60	12	8
6	20823 и 20824	54° 01.170'	142° 57.023'	209	22	103	35	325	47	гориз. растяжение	-0.25	128 ∠ 45	7	5
7	20326	54° 01.058'	142° 56.815'	189	9	92	36	290	52	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	0.25		14	10
8	20327	54° 01.015'	142° 56.746'	218	42	18	47	119	10	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	0.25	313 ∠ 25	9	5
9	20328	54° 00.955'	142° 56.551'	138	37	3	43	248	25	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	0.11	218 ∠ 37	13	6
10	20330	54° 00.541'	142° 56.117'	233	11	54	79	323	0	гориз. сдвиг	-0.10	58 ∠ 61	12	10
11	20331	54° 00.514'	142° 56.136'	246	6	153	3	346	60	гориз. растяжение	-0.18	28 ∠ 75	16	15

Табл. 2. Окончание
Table 2. Continued

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
12	20826	54° 00.505'	142° 56.089'	240	35	46	54	146	7	гориз. сдвиг	0.05	203 ∠ 55	24	13
13	20827	54° 00.485'	142° 56.048'	0	0	270	90	90	0	гориз. сдвиг	0.18	63 ∠ 35	10	5
14	20830	54° 00.427'	142° 55.879'	270	72	53	15	145	11	гориз. сжатие	0.45	38 ∠ 35	9	4
15	20831	54° 00.364'	142° 55.745'	233	11	140	14	0	72	гориз. растяжение	-0.07	118 ∠ 24	13	11
16	20832	54° 00.140'	142° 55.535'	262	42	49	43	156	17	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	0.11	178 ∠ 25	14	12
17	20835	53° 59.897'	142° 55.006'	279	48	76	40	176	12	гориз. сжатие в сочет. со сдвигом	-0.32	243 ∠ 52	16	14
18	20337	53° 59.891'	142° 55.004'	41	11	297	51	139	37	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	0.08	59 ∠ 57	9	8
19	20341	53° 59.542'	142° 54.595'	64	23	164	22	292	57	гориз. растяжение	-0.27		10	9
20	20342	53° 59.475'	142° 54.515'	249	28	137	36	8	41	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	-0.12	100 ∠ 26	10	6
21	20838	53° 59.424'	142° 54.467'	60	0	330	50	150	40	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	-0.04	48 ∠ 75	8	5
22	20842	53° 59.281'	142° 54.385'	246	6	343	49	151	40	гориз. растяж. в сочет. со сдвигом	0.10	38 ∠ 70	6	6
23	20843	53° 59.250'	142° 54.362'	38	42	131	3	225	48	сдвиг в верт. плоскости	-0.42	62 ∠ 60	11	7
24	20841	53° 59.108'	142° 54.257'	66	6	157	10	307	78	гориз. растяжение	-0.07	218 ∠ 52	11	9
25	20345	53° 59.095'	142° 54.268'	108	6	215	71	16	19	гориз. сдвиг	0.12	70 ∠ 75	10	7
26	20846	53° 58.354'	142° 53.879'	257	18	134	60	355	23	гориз. сдвиг	0.14	208 ∠ 55	12	8
27	20847	53° 58.141'	142° 53.810'	206	49	73	31	327	24	гориз. сжатие	-0.27		7	5
28	20809k	53° 58.104'	142° 53.797'	51	22	171	51	307	30	гориз. сдвиг	0.43	33 ∠ 45	11	7
29	20809g	53° 58.104'	142° 53.797'	270	24	104	65	358	8	гориз. сдвиг	-0.13	53 ∠ 33	7	6
30	20809b	53° 58.104'	142° 53.797'	47	11	202	78	316	5	гориз. сдвиг	0.45	28 ∠ 42	5	4
31	20807	53° 57.629'	142° 53.617'	157	5	66	6	290	82	гориз. растяжение	0.06	неясные	14	11
32	20806	53° 57.606'	142° 53.601'	123	24	18	31	244	49	гориз. растяжение	0.29	249 ∠ 76	12	7
33	20805	53° 57.575'	142° 53.596'	52	17	166	53	312	32	гориз. сдвиг	-0.31	258 ∠ 50	11	7

Примечание. В столбцах указаны номера и координаты точек наблюдения, в которых проведена реконструкция с использованием метода катакластического анализа разрывных смещений (Ребецкий, 2007); ориентация (азимуты и углы погружения) осей главных напряжений (σ_1 — минимальных (растяжение), σ_2 — промежуточных и σ_3 — максимальных сжимающих напряжений); тип (обстановка) напряженного состояния; коэффициент Лоде – Надаи μ_σ; элементы залегания слоистости (опр. — опрокинутое), общее количество замеров в точке и в том числе использованных для расчета в программе STRESSgeol. Точки, имеющие номера с буквенными индексами, находятся на близком расстоянии (до 20 м) друг от друга и охарактеризованы замерами разных исследователей: А.В. Маринин (m), П.А. Каменев (k), И.В. Бондарь (b), Н.А. Гордеев (g).

Note. The columns indicate the numbers and coordinates of the observation points where stress state is reconstructed by method of cataclastic analysis (Rebetsky, 2007); orientation (azimuths and dip angles) of the principal stress axes (σ_1 — minimum (extension), σ_2 — intermediate and σ_3 — maximum compressive stresses); stress regime; Lode – Nadai coefficient μ_σ; bedding plane dips (опр. — overturned); the total number of measurements at the point and of those used for calculation in the STRESSgeol program. The points having numbers with letter indices are close to each other (up to 20 m and are characterized by measurements of different researchers: A.V. Marinin (m), P.A. Kamenev (k), I.V. Bondar (b), N.A. Gordeev (g).

Тип напряженного состояния. Рассмотрим распределение реконструированных типов напряженного состояния в пределах Пильского разреза (рис. 9). Из 31 локального стресс-состояния с обстановкой горизонтального сдвига связано 12 определений, а с обстановкой горизонтального сжатия 8 определений (рис. 9, график). Обстановка горизонтального растяжения проявлена слабее (5 определений). Область с преобладанием обстановок горизонтального сдвига в районе р. Водопадная (на севере), закономерно сменяется областью горизонтального сжатия в районе р. Пильво (на юге).

В районе Хейтонского разреза распределение типов напряженного состояния существенно сложнее (рис. 10). В большинстве случаев оно обусловлено положением в разных элементах складчатых структур. Преобладают обстановки горизонтального сдвига (11 определений) и горизонтального растяжения (9 определений), а также их переходных типов. Подавляющая часть обстановок горизонтального растяжения приурочена к приосевым частям антиклинальных складок. В отличие от западного побережья здесь очень мало обстановок горизонтального сжатия. Разница в геодинамическом режиме п-ва Шмидта в его западной и восточной части видна и по ориентировке осей главных напряжений. На Пильском разрезе оси максимального сжатия редко имеют субвертикальное положение (рис. 7). На восточном побережье примерно равное количество осей максимального сжатия имеют субгоризонтальную и субвертикальную ориентировку, т.е. обстановка горизонтального растяжения и горизонтального сдвига здесь равноценны (рис. 10).

Преобладание обстановки горизонтального сдвига является общим для западного и восточного берега п-ва Шмидта. Различными являются распространенные ориентации осей сжатия и растяжения: на западном побережье ось сжатия ориентирована в СЗ, на восточном — в ССЗ, СВ и субширотном направлении; оси растяжения ориентированы в Пильском разрезе в СВ, а в Хейтонском — в ВСВ направлении.

Коэффициент Лоде – Надаи. Рассчитанные значения коэффициента Лоде – Надаи близки к 0, составляя в среднем ±(0.19–0.22). Только 3–4 определения имеют значение более 0.4. По этому параметру вид напряженного состояния соответствую чистому или простому сдвигу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для Южного Сахалина и южной части Центрального Сахалина, до широты г. Углегорска, ранее установлено региональное поле напряжений (в обстановке горизонтального сдвига) с устойчивой субширотной ориентацией оси

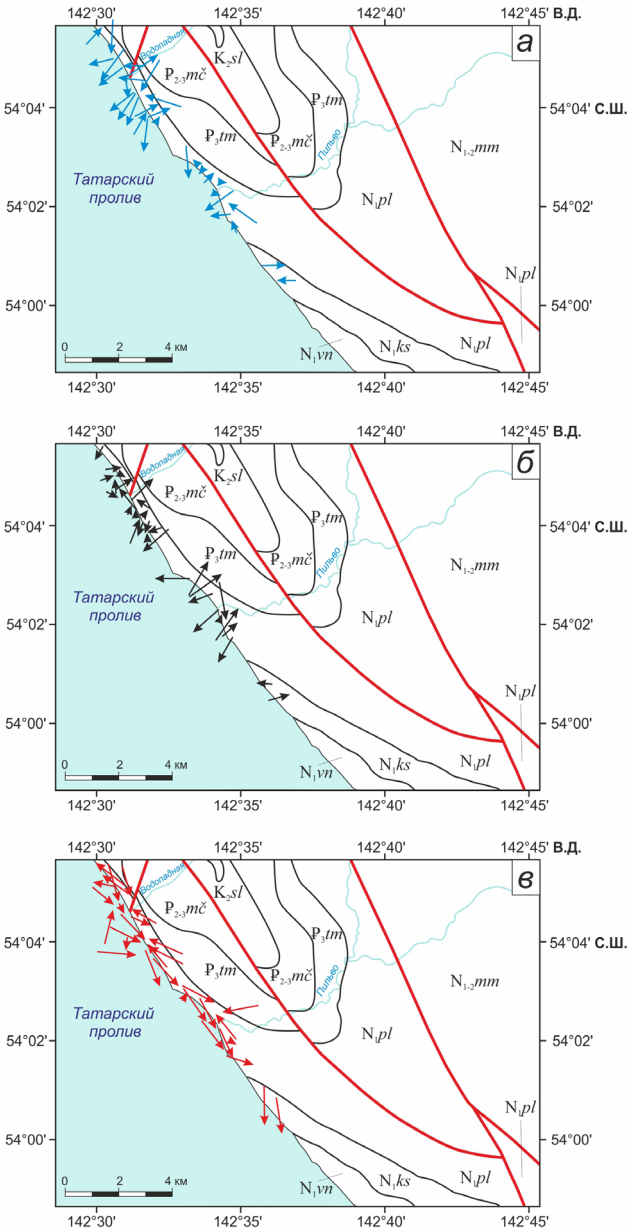


Рис. 5. Ориентировка проекций осей: *а* — растяжения (алгебраически максимальное главное напряжение), *б* — промежуточных главных напряжений (σ_2), *в* — сжатия (алгебраически минимальное главное напряжение) района Пильского разреза (западное побережье полуострова Шмидта). Направление стрелок в сторону погружения. Длина указывает на угол наклона оси: при крутом погружении стрелки короткие, при пологом погружении — длинные.

Fig. 5. Orientation of the projections of the axes: *a* — extension (algebraically maximum principal stress), *б* — intermediate principal stresses (σ_2), *в* — compression (algebraically minimum principal stress) the area of the Pilskiy section area (west coast of the Schmidt Peninsula). The direction of the arrows is in the dip direction. The length indicates the axis inclination angle, shorter arrows for steeper dip.

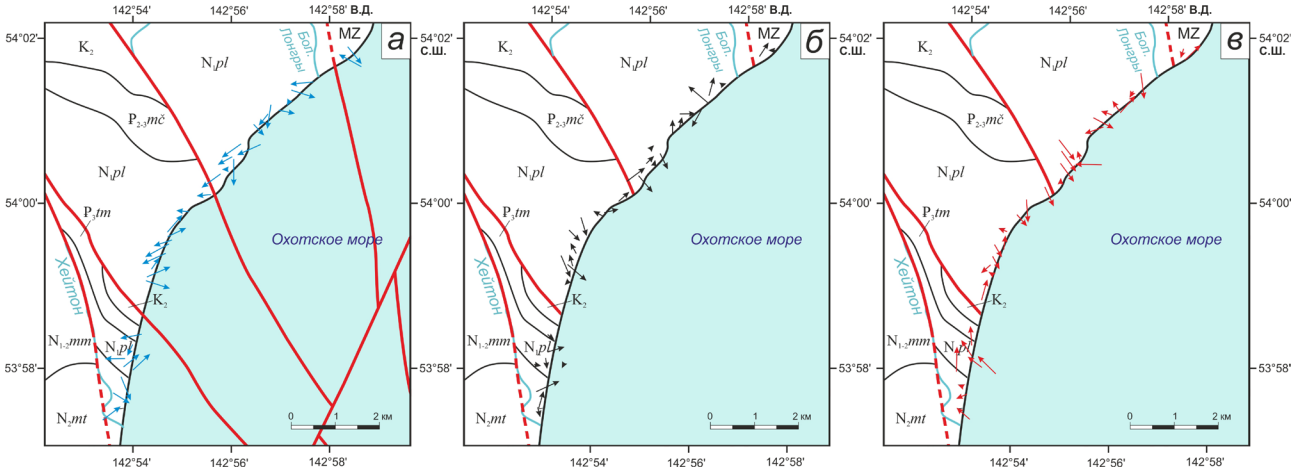


Рис. 6. Ориентировка проекций осей: *а* — растяжения, *б* — промежуточных главных напряжений (σ_2), *в* — сжатия района Хейтонского разреза (восточное побережье полуострова Шмидта). Направление стрелок в сторону погружения. Длина указывает на угол наклона оси: при крутом погружении стрелки короткие, при пологом погружении — длинные.

Fig. 6. Orientation of the projections of the axes: *a* — extension, *б* — intermediate principal stresses (σ_2), *в* — compression of the Kheyton section area (east coast of the Schmidt Peninsula). Orientation of the arrows in the dip direction. The length indicates the axis inclination angle, shorter arrows for steeper dip.

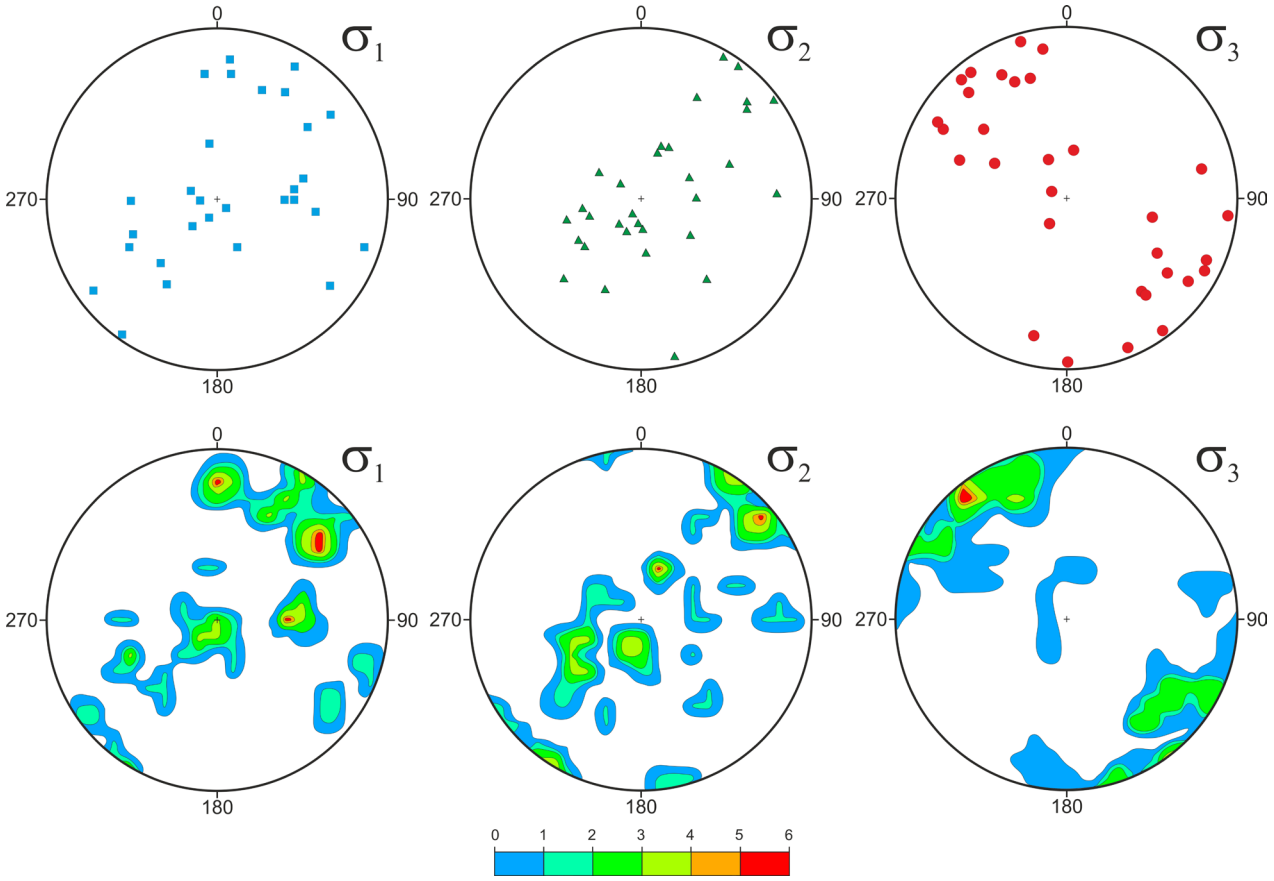


Рис. 7. Ориентировка осей главных напряжений для локальных стресс-тензоров в пределах Пильского разреза (западное побережье полуострова Шмидта). На круговых диаграммах (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) показаны выходы осей главных напряжений: σ_1 — растяжения, σ_2 — промежуточных главных и σ_3 — сжатия. На шкале приведены изолинии плотности концентрации соответствующих осей.

Fig. 7. Orientation of the principal stress axes for local stress tensors within the Pilskiy section (west coast of the Schmidt Peninsula). The stereoplots (stereographic projection on the upper hemisphere) show the outputs of the principal stress axes: σ_1 — extension, σ_2 — intermediate and σ_3 — compression. The scale shows the isolines of the concentration density of the corresponding axes.

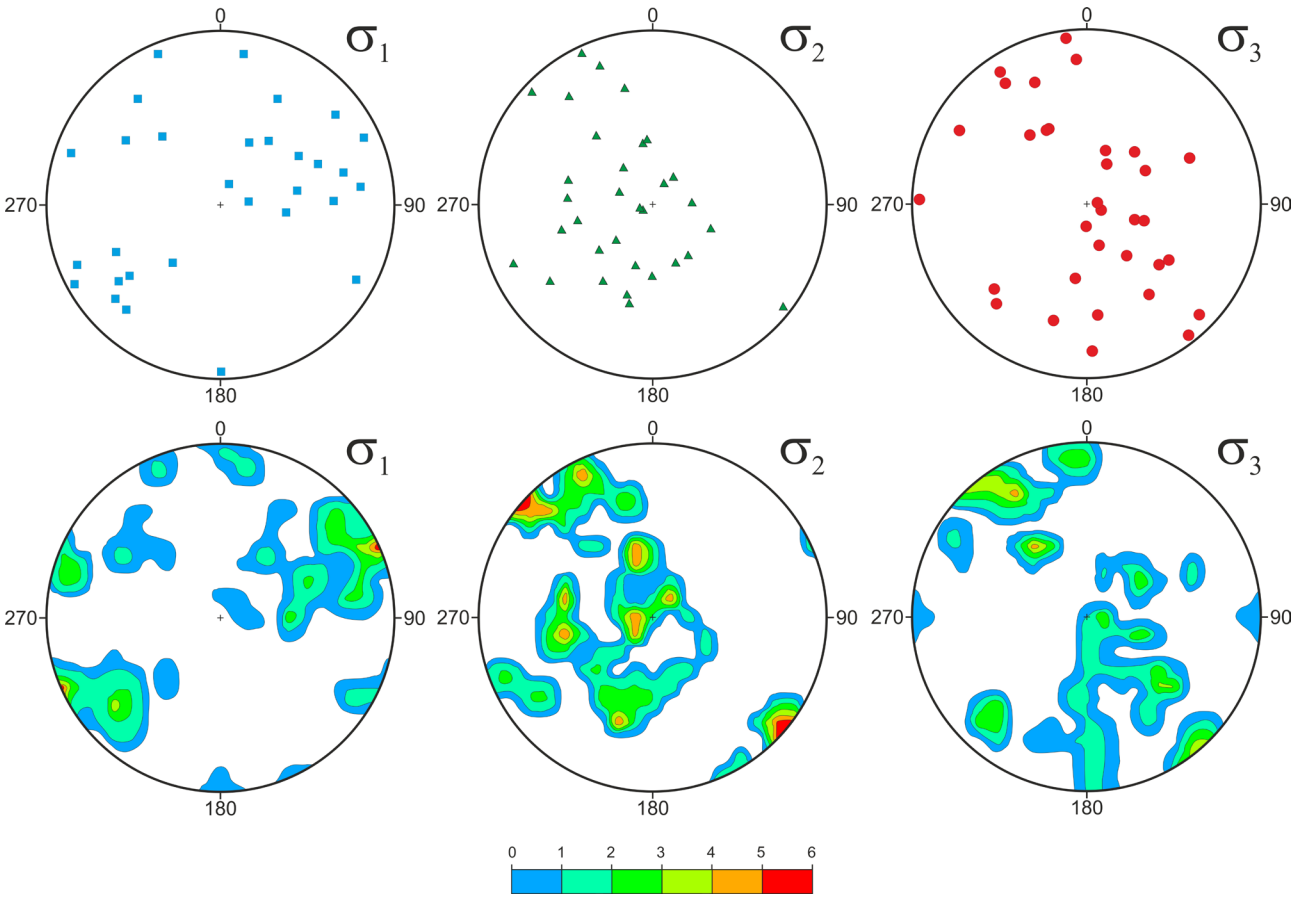


Рис. 8. Ориентировка осей главных напряжений для локальных стресс-тензоров в пределах Хейтонского разреза (восточное побережье полуострова Шмидта). На круговых диаграммах (стереографическая проекция на верхнюю полусферу) показаны выходы осей главных напряжений: σ_1 — растяжения, σ_2 — промежуточных главных и σ_3 — сжатия. На шкале приведены изолинии плотности концентрации соответствующих осей.

Fig. 8. Orientation of the principal stress axes for local stress tensors within the Kheyton section (east coast of the Schmidt Peninsula). The stereoplots (stereographic projection on the upper hemisphere) show the outputs of the principal stress axese: σ_1 — extension, σ_2 — intermediate and σ_3 — compression. The scale shows the isolines of the concentration density of the corresponding axes.

сжатия и субмеридиональной осью растяжения, установленное по данным реконструкции более 50 локальных стресс тензоров (Сим и др., 2017а, 2017б). Полученные нами свидетельства значительных вариаций напряженного состояния на п-ве Шмидта, как в латеральном плане, так и возможно во временном интервале за относительно небольшой период после осадконакопления – миоцен-антропоген, могут указывать на большую тектоническую активность новейших структур. На отличающуюся от всего Сахалина обстановку указывает и изменение простирания этой части острова в СЗ направлении (относительно в целом меридионального простирания Сахалина). Предполагается, что это может быть связано с активным развитием впадины Дерюгина в Охотском море непосредственно восточнее п-ва Шмидта (Родников и др., 2002). Обстановка горизонтального растяжения в этой части полуострова подтверждается наличием отрывных структур, которые параллельны побережью и нарушают наблюдаемые зеркала скольжения. Причем для Пильского разреза оси растяжения ориентированы ортогонально западному побережью и склону расположенной на востоке впадины Дерюгина (рис. 1). На Хейтонском разрезе оси растяжения ориентированы несколько косо к изгибу побережья, но также ортогонально основной линии побережья п-ва Шмидта и уступу впадины. На такую геодинамическую обстановку современного напряженного состояния в этой части акватории Охотского моря указывают и определения напряженного состояния по механизмам очагов землетрясений: в двух очагах землетрясений (рис. 1), произошедших между указанной впадиной и п-вом Шмидта (к северо-востоку от него), восстановлены обстановки горизонтального сдвига с северо-восточным направлением оси T, не свойственные для остальной территории Сахалина (Коновалов и др., 2014).

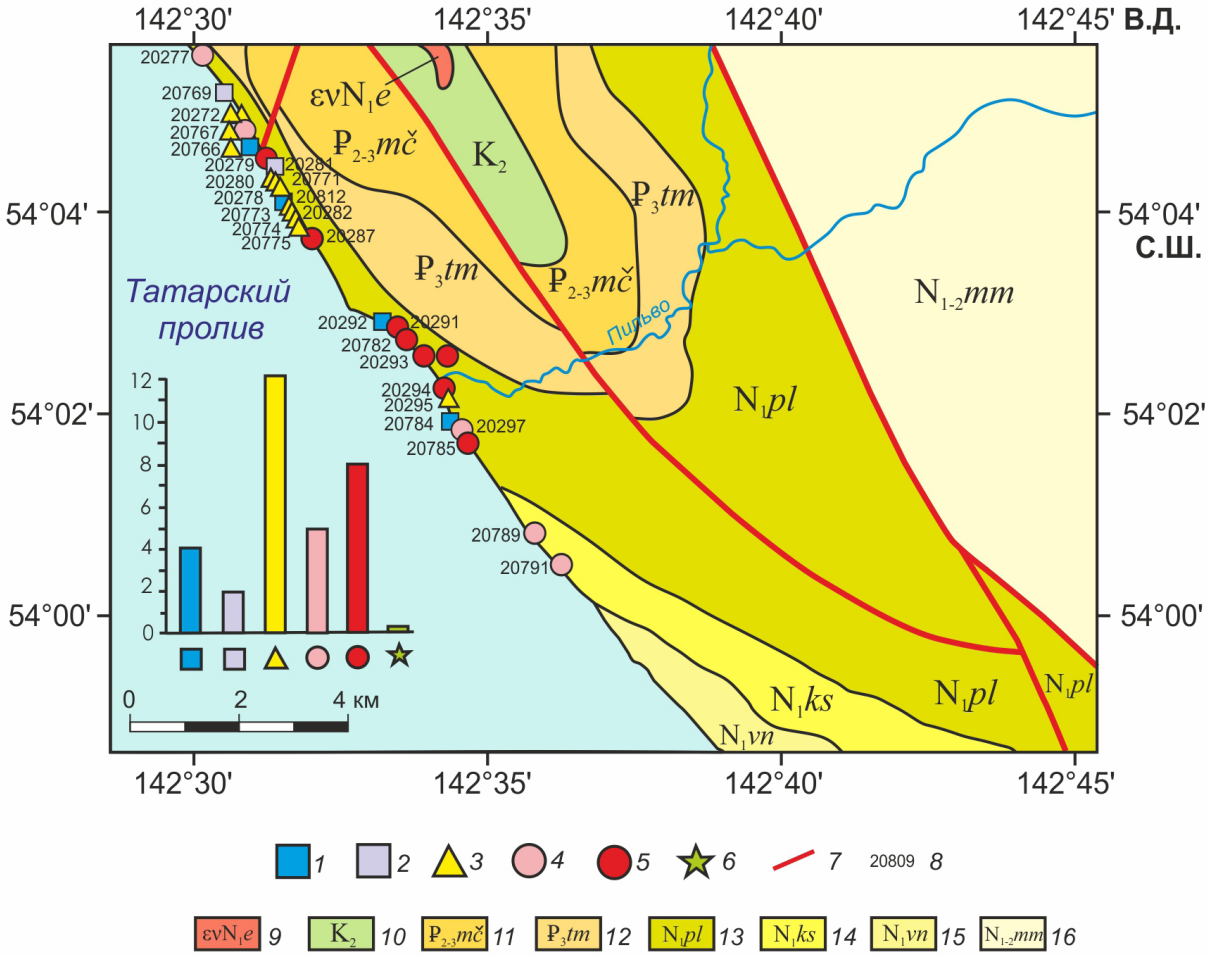


Рис. 9. Типы напряженного состояния на западном побережье полуострова Шмидта (район Пильского разреза), определенные по собранным геологическим индикаторам палеонапряжений при помощи метода катакластического анализа разрывных нарушений: *1* — горизонтальное растяжение; *2* — горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом; *3* — горизонтальный сдвиг; *4* — горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом; *5* — горизонтальное сжатие; *6* — сдвиг в вертикальной/горизонтальной плоскости; *7* — разрывные нарушения; *8* — номера точек наблюдения; *9* — интрузии сложного состава; *10* — верхнемеловые отложения; *11* — мачигарская свита; *12* — тумская свита, *13* — пильская вита; *14* — каскадная свита; *15* — венгерийская свита; *16* — маямрафская свита.

Fig. 9. Types of stress state of the Pilskiy section area (west coast of the Schmidt Peninsula), determined from the collected geological indicators of paleonstresses using the method of cataclastic analysis of structural discontinuities: *1* — horizontal extension; *2* — horizontal extension in combination with shear; *3* — horizontal shear; *4* — horizontal compression in combination with shear; *5* — horizontal compression; *6* — shear in the vertical/horizontal plane; *7* — structural discontinuities; *8* — numbers of observation points; *9* — intrusions of complex composition; *10* — Upper Cretaceous deposits; *11* — Machigarskaya Formation; *12* — Tumskaya Formation, *13* — Pilskaya Formation; *14* — Kascadnaya Formation; *15* — Vengeriyskaya Formation; *16* — Mayamrafskaya Formation.

Причины особой ориентировки оси максимального сжатия для п-ва Шмидта (ССЗ ориентации) могут служить направлением последующих исследований и тектонических построений. Возможными вариантами объяснений подобной аномалии, по нашему мнению, может служить расположение п-ва Шмидта в концевой части региональной сдвиговой зоны. Установленное направление максимального сжатия хорошо соотносится с региональными структурами в районе Пильского разреза — правыми сдвигами СЗ простирания и левыми сдвигами ССВ простирания, показанными на геологической карте (Государственная.., 2018). Полученные полевые тектонофизические данные предваряют анализ по сейсмологическим данным, которых в настоящее время еще недостаточно для этой части Сахалина для проведения подробной реконструкции тектонических напряжений.

Результаты реконструкции тектонических напряжений на п-ве Шмидта показали следующее:

– на западном побережье (Пильский разрез) реконструированы северо-западные (до ССЗ) направления максимального сжатия;

– на восточном побережье (Хейтонский разрез) положение оси максимального сжатия локальных стресс-тензоров имеет значительные вариации. Определены северо-западные, северо-восточные, субмеридиональные направления оси максимального сжатия, а также субвертикальная ее ориентация;

– среди типов напряженного состояния на п-ве Шмидта отчетливо преобладают обстановки горизонтального сдвига. При этом на западном побережье они сочетаются с обстановками горизонтального сжатия, а на восточном — с обстановками горизонтального растяжения;

– на западном побережье (Пильский разрез) при выдержанном залегании выявлена латеральная вариация параметров напряженно-деформированного состояния;

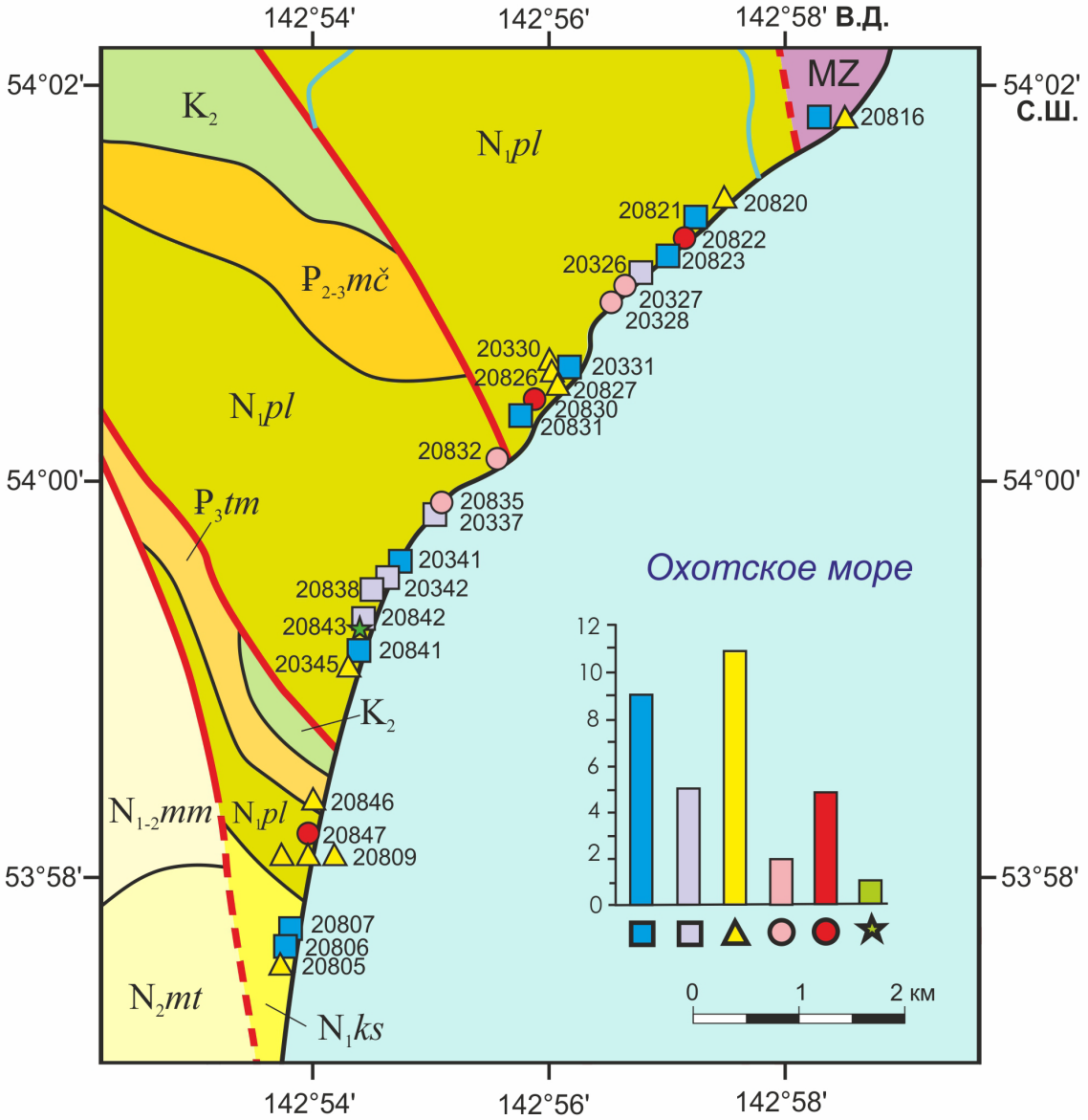


Рис. 10. Типы напряженного состояния района на восточном побережье полуострова Шмидта (район Хейтонского разреза), определенные по собранным геологическим индикаторам палеонапряжений при помощи метода катакластического анализа разрывных нарушений. Условные обозначения №№ 1–8 представлены на рис. 9, а также: *9* — Южно-Шмидтовский массив, серпентинизированные лерцолиты, гарцбургиты, дуниты; *10* — верхнемеловые отложения, *11* — мачигарская свита, *12* — тумская свита, *13* — пильская свита; *14* — каскадная свита; *15* — маямрафская свита, *16* — матитукская свита.

Fig. 10. Stress state types of the Kheyton section area (east coast of the Schmidt Peninsula), determined from the collected geological indicators of paleonstresses using the cataclastic analysis method of structural discontinuities. Symbols №№ 1–8 are shown in Fig. 9, others are: *9* — the South Schmidt massif, serpentinized lherzolites, harzburgites, dunites; *10* — Upper Cretaceous deposits; *11* —Machigarskaya Formation; *12* — Tumskaya Formation; *13* — Pilskaya Formation; *14* — Kascadnaya Formation; *15* — Mayamrafskaya Formation; *16* — Matitukskaya Formation.

– на восточном побережье (Хейтонский разрез) вариации напряженно-деформированного состояния определяются положением в тектонической структуре (разных частях складок, расположением вблизи крупных региональных нарушений).

Результаты проведенных исследований использованы при разработке методики выявления нефтенасыщенных трещинных коллекторов в мощных кремнистых толщах Охотоморского бассейна.

Полевые работы организованы ООО «РН-СахалинНИПИморнефть». Авторы благодарят Р.Р. Халиулина, Э.К. Хмарина, Б.И. Сизанова и А.В. Левина за помощь в организации полевых исследований и конструктивное обсуждение их результатов. Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Госзадания ИФЗ РАН.

Список литературы [References]

Гладенков Ю.Б., Баженова О.К., Гречин В.И. и др. Кайнозой Сахалина и его нефтегазоносность / Под ред. Ю.Б. Гладенкова. М.: ГЕОС, 2002. 225 с. [*Gladenkov Yu.B., Bazhenova V.I., Grechin L.S. et al.* The Cenozoic Geology and the Oil and Gas Presence in Sakhalin. Moscow: GEOS, 2002. 225 p (in Russian)].

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-б 1 : 1 000 000, лист N-54, автор С.А. Бондаренко. Роснедра, 2018 [State geological map of Russian Federation on a scale of 1:1000000. Sheet N-54. S.A. Bondarenko. Rosnedra, 2018 (in Russian)].

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Сахалинская. Лист N-54-XVII (мыс Елизаветы), (авт. Коноваленко А.А. и др.), 2009 г. [State geological map of Russian Federation on a scale of 1:200000. Sheet N-54-XVII (cape Elizabeth) Konovalenko A.A. et al., 2009 (in Russian)].

Каменев П.А., Дегтярев В.А., Костров Ю.В. и др. Изучение трещинных коллекторов северного Сахалина в рамках комплексной экспедиции 2020 года // Вестник ДВО РАН. 2021. № 2. (216). С. 114–122. https://doi.org/10.37102/0869-7698_2021_216_02_12 [*Kamenev P.A., Degtyarev V.A., Kostrov Yu.V. et al.* Study of fractured reservoirs in Northern Sakhalin as part of a comprehensive expedition in 2020 // Vestnik DVO RAN. 2021. № 2 (216). P. 114–122 (in Russian)].

Каспарьян Э.В., Козырев А.А., Иофис М.А., Макаров А.Б. Геомеханика. М.: Высш. шк., 2006. 502 с. [*Kasparyan E.V., Kozyrev A.A., Iofis M.A., Makarov A.B.* Geomechanics. M.: Visshaya shkola, 2006. 502 p. (in Russian)].

Кожурин А.И., Лободенко И.Ю., Стром А.Л. Следы сильных землетрясений на п-ве Шмидта — северной части острова Сахалин в голоценовое время // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. № 4. С. 23–29 [*Kozhurin A.I., Lobodenko I.Yu., Strom A.L.* Evidence of strong earthquakes on the Schmidt Peninsula – northern part of Sakhalin Island in the Holocene // Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2009. №4. P. 23–29 (in Russian)].

Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с. [*Konovalov A.V., Nagornykh T.V., Safonov D.A.* Modern studies of earthquake sources mechanisms of Sakhalin Island. Vladivostok: Dal'nauka, 2014. 252 p. (in Russian)].

Костров Ю.В., Дегтярев В.А., Маринин А.В. и др. Изучение трещинных коллекторов при проведении геологоразведочных работ в северо-восточной части о. Сахалин // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 2. № 5. С. 153–166. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.2.153-166 [*Kostrov Yu.V., Degtyarev V.A., Marinin A.V. et al.* Study of fractured reservoirs during geological exploration in the north-eastern part of the Sakhalin Island // Geosystems of Transition Zones. 2021. V. 5. № 2. P. 153–166 (in Russian)].

Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР, 1987. Ч. 2. С. 173–235 [*Rastsvetaev L.M.* Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic faults // Problems of structural geology and physics of tectonic processes. Moscow: GIN AN SSSR. 1987. V. 2. P. 173–235 (in Russian)].

Ребецкий Ю.Л. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // ДАН. 2003. Т. 3. № 2. С. 237–241 [*Rebetsky Yu.L.* Development of the Method of Cataclastic Analysis of Shear Fractures for Tectonic Stress // Doklady Earth Sciences. 2003. V. 388. № 1. P. 72-76].

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Изд. Наука. 2007. 406 с. [*Rebetskiy Yu.L.* Tectonic stresses and strength of natural massifs. Moscow: Akademkniga, 2007. 406 p. (in Russian)].

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. Москва: Издательство ГЕОС, 2017. 234 с [*Rebetskiy Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V.* From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms. Moscow: GEOS, 2017. 234 p. (in Russian)].

Родников А.Г., Сергеева Н.А., Забаринская Л.П. Глубинное строение впадины Дерюгина (Охотское море) // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21. № 4. С. 3–8 [*Rodnikov A.G., Sergeyeva N.A., Zabarinskaya L.P.* The Deep Structure of The Deryugin Basin (the Sea of Okhotsk) // Russian Journal of Pacific Geology. 2002. V. 21. № 4. P. 3–8 (in Russian)].

Рождественский В.С. Сдвиги в Восточном хребте п-ва Шмидта на Сахалине // ДАН. 1979. Т. 240. С. 230–241 [*Rozhdestvensky V.S.* Strike-slip faults in the East Sakhalin mountains of Schmidt Peninsula on Sakhalin // Doklady AN SSSR 1979. V. 240. P. 230–241 (in Russian)].

Рождественский В.С. Роль сдвигов в формировании структуры о. Сахалин // Геотектоника. 1982. № 4. С. 99–111 [*Rozhdestvensky V.S.* The role of strike-slip in the structure of Sakhalin // Geotectonics. 1982. № 16. P. 323–332].

Рождественский В.С. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция Центрально-Сахалинского разлома в

кайнозое // Тихоокеанская геология. 2008. № 1. С. 17–28 https://doi.org/10.1134/S1819714008010028 [*Rozhdestvensky V.* Active rifting in the Japan and Okhotsk Seas and the tectonic evolution of the Central Sakhalin Fault in the Ceinozoic // Russian Journal of Pacific Geology. 2008. № 2. P. 15–24].

Сим Л.А., Богомолов Л.М., Брянцева Г.В., Саввичев П.А. Неотектоника и тектонические напряжения острова Сахалин // Геодинамика и тектонофизика. 2017а. Т. 8. № 1. С. 181–202. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0237 [*Sim L., Bogomolov L., Bryantseva G., Savvichev P.* Neotectonics and tectonic stresses of the Sakhalin Island // Geodynamics & Tectonophysics. 2017a. V. 8. P. 181–202 (in Russian)].

Сим Л.А., Богомолов Л.М., Кучай О.А., Татаурова А.А. Неотектонические и современные напряжения Южного Сахалина // Тихоокеанская геология. 2017б. Т. 36. № 3. С. 88–101. https://doi.org/10.1134/S1819714017030058 [*Sim L.A., Bogomolov L.M., Kuchai O.A., Tataurova A.A.* Neotectonic and modern stresses of South Sakhalin // Russian Journal of Pacific Geology. 2017b. T. 11. № 3. P. 223–235. https://doi.org/10.1134/S1819714017030058

Kozhurin A.I. Active faulting at the Eurasian, North American and Pacific plates junction // Tectonophysics. 2004. V. 380. Iss. 3–4. P. 273–285. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.024

RECONSTRUCTION OF TECTONIC STRESSES ON THE SCHMIDT PENINSULA (SAKHALIN)

A.V. Marinin[1], Yu.L. Rebetskiy[1], L.A. Sim[1], P.A. Kamenev[2], Yu.V. Kostrov[3], I.V. Bondar[1], N.A. Gordeev[1], V.A. Degtyarev[2, 3]

[1]Schmidt Institute of Earth Physics, RAS, Moscow, Russia
[2]Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
[3]LLC «RN-SakhalinNIPImorneft», Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

The article presents data on the stress state of the Schmidt Peninsula of Sakhalin Island, obtained as a result of field tectonophysical studies in 2020. The importance of studying the northern part of Sakhalin is due to the prospects of this region for the minerals search. The performed studies allowed us to establish differences in the geodynamic condition between the western and eastern coasts of the peninsula. In general, the conditions of horizontal shear (shear type of deformation) prevail among the types of stress state in the studied territory. On the east coast, there are many situations of horizontal extension, which are usually confined to the axial parts of anticlinal structures. The west coast is characterized by the stable orientation of the axis of maximum compression in the NW direction and its subhorizontal position. For the east coast, the direction of the reconstructed orientations of maximum compression is characterized by greater variability. According to the data of the reconstruction, the stress-and-strain state pattern of the Schmidt Peninsula has significant differences from the main territory of Sakhalin Island.

Keywords: tectonic stresses, deformations, slickensides, fracturing, Sakhalin Island.

Поступила в редакцию 06.09.2021 г.
После доработки 16.11.2021 г.
Принята к публикации 27.12.2021 г.