

## Структура сейсмичности и тип современных тектонических деформаций зоны Черского (северо-восток Якутии)

Л.П.ИМАЕВА (Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН); 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128; Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39),

Б.М.КОЗЬМИН (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39),

В.С.ИМАЕВ, В.И.МЕЛЬНИКОВА (Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН); 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128; Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г. Якутск, проспект Ленина, д. 39)

Для континентальной части Арктико-Азиатского сейсмического пояса проведен сравнительный анализ региональной динамической модели формирования главных сейсмогенерирующих структур зоны Черского с параметрами напряженно-деформированного состояния земной коры, рассчитанными по сейсмологическим данным. Сопоставление кинематических характеристик активных разломов и проявлений сейсмичности выявило определенную закономерность пространственного распределения тектонических блоков, являющихся аккумуляторами тектонических напряжений. В результате обоснована тектоническая позиция и структурно-динамическая организация эпицентральных полей региона, а также выявлена зональность смены тектонических режимов на границе Евразийской и Североамериканской плит.

*Ключевые слова:* Арктико-Азиатский сейсмический пояс, сеймотектоническая зона Черского, активные разломы, механизм очага землетрясений, средний тензор сеймотектонических деформаций, динамика сейсмогенерирующих структур, структурно-динамическая модель.

Имаева Людмила Петровна  
Козьмин Борис Михайлович  
Имаев Валерий Сулейманович  
Мельникова Валентина Ивановна



imaeva@crust.irk.ru  
b.m.kozmin@diamond.ysn.ru  
imaev@crust.irk.ru  
vimel@ crust.irk.ru

## Seismic structure and the type of present-day tectonic deformations of the Chersky zone, north-east Yakutia

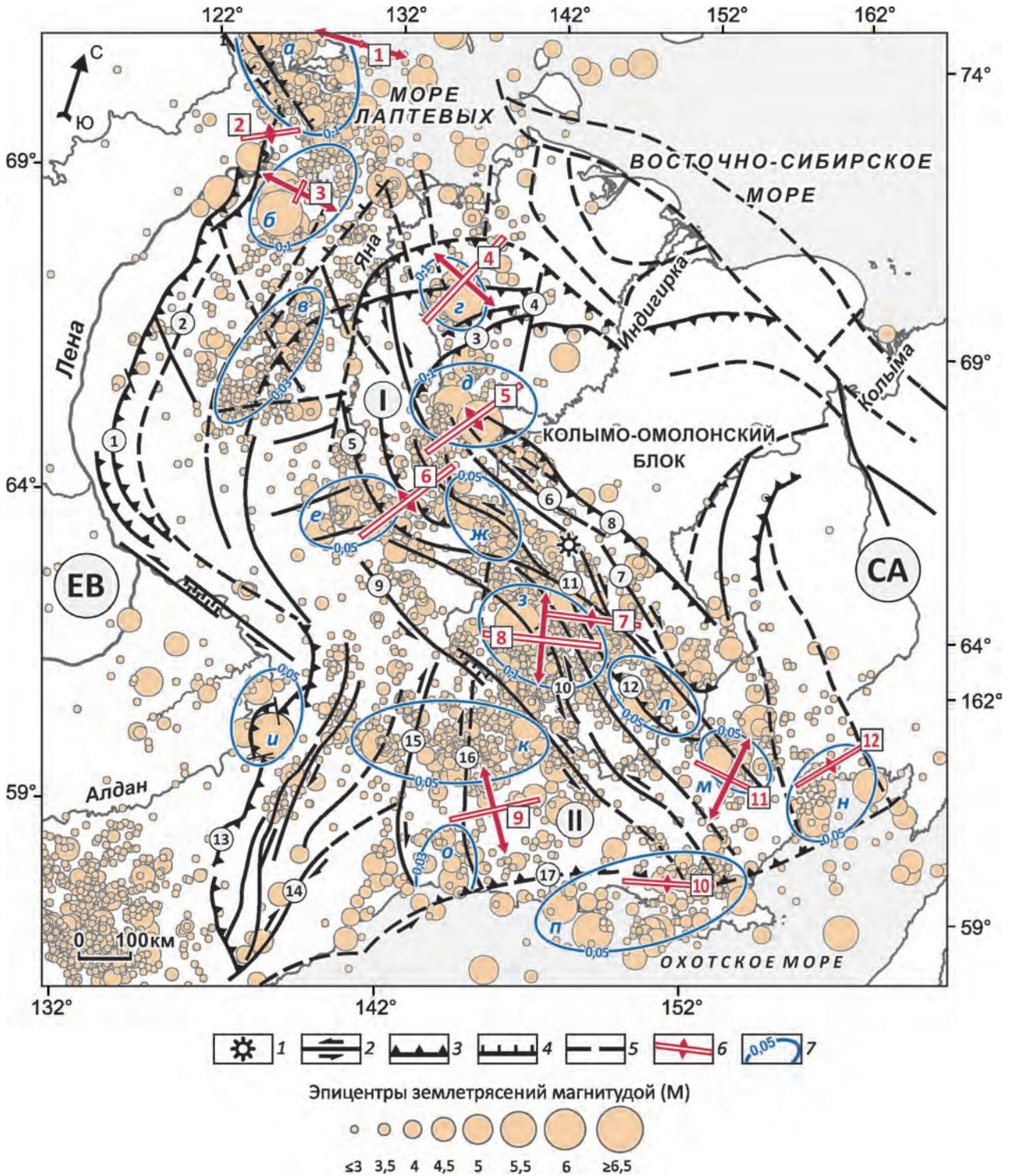
L.P.IMAEVA, B.M.KOZ'MIN, V.S.IMAEV, V.I.MEL'NIKOVA

For the continental part of the Arctic-Asian seismic belt, a comparative analysis is made of the regional dynamic model for the formation of major seismogenic structures in the Chersky zone and the parameters of the stress-and-strain state of the Earth's crust calculated from seismological data. Comparison between kinematic characteristics of active faults and seismic manifestations revealed a regularity in spatial distribution of tectonic blocks which accumulate tectonic stresses. The data obtained made it possible to substantiate the tectonic position and structural-dynamic characteristics of epicentral fields in the region as well as reveal zoning in the change of tectonic regimes at the Eurasia-North America boundary.

*Key words:* Arctic-Asia seismic belt, Chersky seismotectonic zone, active faults, earthquake focal mechanism, average tensor of seismotectonic deformations, dynamics of seismogenic structures, structural-dynamic model.

Настоящие исследования являются продолжением изучения современных тектонических режимов в пределах Арктико-Азиатского сейсмического пояса [2], континентальную часть которого представляет сеймотектоническая зона Черского. В данной работе на

основе инструментальных сейсмологических наблюдений [4, 5, 13], результатов расчёта среднего тензора сеймотектонических деформаций, а также обобщения геолого-структурных [3, 4, 9], геофизических [4, 22] и морфотектонических [3, 4, 6, 7] сведений уточняется



региональная структурно-динамическая модель формирования сейсмогенерирующих структур зоны Черского, которая может использоваться для детального сейсмораионирования территории.

**Активные разломы.** В структурно-тектоническом плане зона Черского рассматривается как Колымо-Омолонский супертеррейн, который объединяет несколько

перикратонных террейн, примыкающих с востока к Верхоянскому складчато-надвиговому поясу, а также ряд террейн, расположенных к северо-западу от Колымо-Омолонского блока [9, 20]. Упомянутые террейн (блоки) разграничиваются между собой системой разновозрастных тектонических нарушений, которые активны в современное время в зоне Черского [4, 6, 7].

Рис. 1. Схема сейсмотектоники зоны Черского:

1 – вулкан Балаган-Тас; 2–5 – кинематика разломов: 2 – сдвиги, 3 – надвиги и взбросы, 4 – сбросы, 5 – предполагаемые; 6 – горизонтальная проекция главных осей деформаций: удлинения – красные стрелки и укорочения – белые линии (в квадратах и таблице – номера области расчета СТД); 7 – изолинии сейсмической активности, оконтуривающие максимумы: а – Оленёкский, б – Хараулахский, в – Омолойский, г – Полоусненский, д – Андрей-Тасский, е – Адыча-Тарынский, ж – Чибгалахский, з – Верхненерский, и – Бурхалинский, к – Сунтар-Хаятинский, л – Улахан, м – Купкинский, н – Ланкомовский, о – Кетандинский, п – Челомджа-Ямский; активные разломы (номера в кружках): 1 – Западно-Верхоянский краевой шов, 2 – Центрально-Верхоянский, 3 – Полоусненский, 4 – Селенняхский, 5 – Адыча-Тарынский, 6 – Илин-Тасский, 7 – Арга-Тасский, 8 – Мятисский, 9 – Брюнгадинский, 10 – Чай-Юреинский, 11 – Улахан, 12 – Дарпир, 13 – Нелькано-Кыллахский краевой шов, 14 – Билякчанский, 15 – Кетандинский, 16 – Нют-Ульбейский, 17 – Челомджа-Ямский; литосферные плиты: Ев – Евразийская, СА – Североамериканская; сегменты сейсмотектонической зоны Черского: I – Яно-Индибирский сегмент, II – Индигиро-Колымский сегмент

Они представлены на рис. 1, где также показаны эпицентры землетрясений магнитудой  $M$  3,5–6,5, тяготеющие к зонам влияния этих разрывов.

Следует отметить, что большинство рассматриваемых разломов и их современная активизация относятся к зоне сжатия, существующей на границе между крупными Евразийской и Североамериканской литосферными плитами, которые взаимодействуют на Северо-Востоке Азии [4, 20, 24]. Остановимся на характеристике генеральных разломов, которые в зоне Черского играют основную структурообразующую роль в формировании современного рельефа и являются главными сейсмогенерирующими структурами.

**Система разлома Улахан** (см. рис. 1, № 11) является основным наиболее протяжённым тектоническим разрывом и прослеживается более чем на 1500 км от Сеймчано-Буондинской впадины на юго-востоке до субширотного отрезка р. Индигирка в её среднем течении [4]. По длине и кинематике данный дизъюнктив сопоставим с известным разломом Сан-Андреас в Калифорнии [23]. Продолжение разлома Улахан в направлении Охотского побережья проблематично, хотя по ряду признаков (геоморфологическим и дешифровочным) разлом может быть прослежен до побережья Охотского моря. Его северо-западным окончанием на левобережье р. Индигирка служит разветвление на Догдинский (Чемалгинский) разлом, который затухает в бассейне р. Яна, и Адыча-Тарынский разлом (см. рис. 1, № 5), прослеживающийся в верховье р. Адыча [4].

Впервые Улахан был выделен А.С.Симаковым в 1949 г. и в дальнейшем изучался многими геологами [3, 4, 11, 12, 14]. При дешифрировании космоснимков (рис. 2) линия разлома отчётливо выделяется в виде эшелона левых кулис, в полостях которых заложен ряд молодых впадин «pull-apart», выраженных на топокартах и в рельефе. Пространственное соотношение зоны влияния Улахана со складчатостью и поясом гранитоидных интрузий, наличием выходов крупных блоков палеозойских пород (Омулевское, Тас-Хаяхтахское поднятия), расположенных на расщепляющихся концах осевой зоны разлома Улахан, позволяет прийти к выводу, что он представляет собой крупнейшую сдвиговую систему на северо-востоке России [4].

Величины горизонтальных перемещений по плоскости разлома Улахан оценивались в районе западного обрамления Омулевского блока. Левосторонние горизонтальные смещения считывались с крупномасштабных топографических карт (масштаб 1:100 000) по однотипным смещениям небольших притоков, которые пересекали плоскость разлома и были заложены перпендикулярно его простиранию. Следует отметить, что суммарная величина горизонтального смещения в 23–24 км в зоне этого разлома была получена магаданскими геологами [16] при построении ими геологической карты Омулевского блока. Примерно такая же величина смещения в 24 км получается, если оценивать ее по ширине понижения в рельефе, которому соответствует молодая впадина «pull-apart» между реками Сумун и Улахан-Нагаин. Время начала горизонтальных сдвиговых смещений может быть определено в первом приближении как среднеплиоценовое, когда, по мнению большинства геоморфологов, была заложена сеть водотоков этого района, то есть около 3,4 млн. лет тому назад. В таком случае скорость движения по разлому составляет около 0,7–0,8 см/год. Распределение структурных элементов в изученных точках наблюдений по разлому Улахан находится в хорошем соответствии с теоретическими моделями развития сопутствующих разломов в зонах крупных сдвигов [15], которые выделяются в самостоятельный класс «дуплексы сдвиговых зон» [25].

В течение 1964–2016 гг. в зоне влияния Улахана отмечено около 14 тыс. подземных толчков, которые были зафиксированы до глубин в 25–30 км в пределах земной коры (её мощность здесь ~35 км [20, 22]). Интенсивность больше десятка из них достигала в эпицентре 6–7 баллов. Однако за этот период не было зарегистрировано ни одного сильного события с интенсивностью в эпицентре более 7 баллов.

Повышенная мобильность Улахана подтверждается наличием в зоне его влияния вторичных проявлений современных землетрясений в виде обвалов, осыпей, камнепадов и др., а также следов крупных сейсмических событий прошлого (~20 палеосейсмодислокаций возрастом от 1 тыс. лет и меньше). К наиболее крупным из них относятся сейсмодислокации Чибгалах,

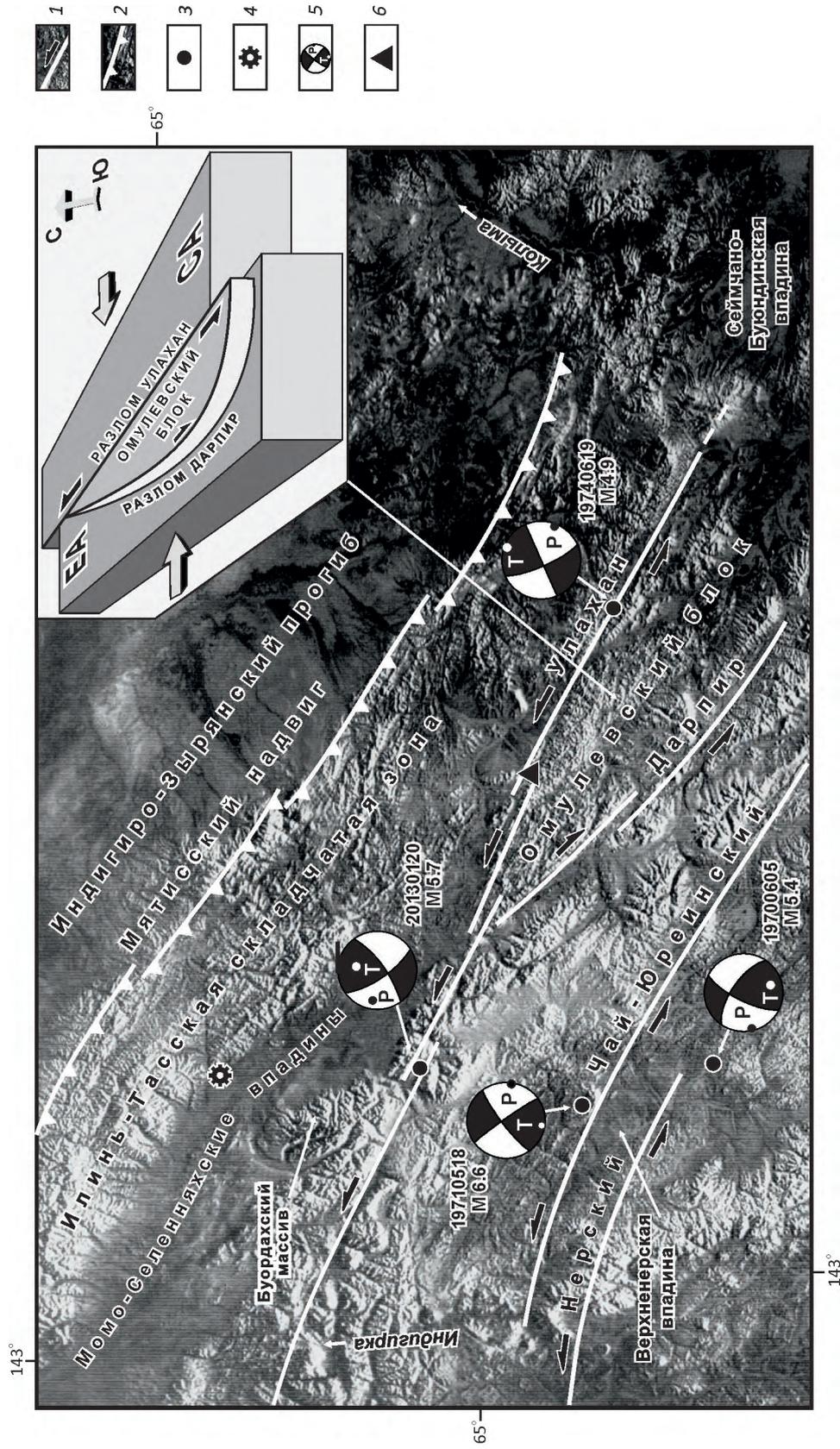


Рис. 2. Главные сейсмогенерирующие структуры зоны Черского:

1-2 – активные разломы: 1 – сдвиги, 2 – надвиги; 3 – эпицентр землетрясения; 4 – вулкан Балаган-Тас; 5 – стереограммы фокальных механизмов (нижняя полусфера, P – ось сжатия, T – ось растяжения) для землетрясений (дата и магнитуда): Верхнеколымского M 5,4, 1970.06.05, Сеймчанского M 4,9, 1974.06.19, Артынского M 6,6, 1971.05.18, Улахан-Чистайского M 5,7, 2013.01.20 [4, 8]; 6 – сейсмодислокации; на вставке – структурно-динамическая модель Омулевского блока; ОМ – Охотоморский блок, СА – Северо-американская плита; стрелками указано направление движения движения плит

Тирехтях, Урультун и Купкинская [3, 4]. Из хорошо сохранившихся древних дислокаций в зоне Улахан известна обвальная плотина Тирехтях высотой до 50 м, возникшая в момент землетрясения примерно 1 тыс. лет назад и перекрывшая один из водотоков в долине р. Тирехтях, левого притока р. Мома [3, 4, 13].

Вместе с тем 20 января 2013 г. именно на этом участке возник крупный очаг Улахан-Чистайского землетрясения с интенсивностью в эпицентре до 8 баллов, как яркий пример современной реактивации тектонических движений на разломе Улахан за весь 50-летний период инструментальных наблюдений. Толчок отмечен в 8 ч. 38 мин. Гринвича магнитудой  $M 5,7$  на глубине 23 км в хр. Улахан-Чистай (центральная часть зоны Черского) вблизи восточного окончания кайнозойской Бугчанской впадины. Его координаты соответствовали  $64,76^\circ$  с.ш. и  $146,66^\circ$  в.д. Согласно опросов местного населения землетрясение ощущалось в трёх северо-восточных районах Республики Саха (Якутия) (Оймяконском, Момском и Верхнеколымском), а также на юге Магаданской области на площади почти 300 тыс. км<sup>2</sup>. Его воздействия почувствовали жители 12 населенных пунктов. По этим данным была построена карта изосейст (рис. 3).

Особенно сильно его макроэффекты проявились в эпицентральной области (14 км к северо-западу от эпицентра), которую вдоль террасы руч. Джопкачан (левый приток р. Тирехтях, бассейн р. Мома) пересекает автозимник Сасыр-Усть-Нера. Как отметили водители, проезжавшие здесь перед новым годом, дорога была в хорошем состоянии. Отправившись в обратный путь после землетрясения, группа автомашин попала в несколько глубоких канав и рытвин глубиной до 1 м, образовавшихся поперек полотна дороги. Они возникли после землетрясения и были заполнены снегом с водой, при этом вода была выдавлена при смещении грунта.

В ближайшем к эпицентру селе Сасыр (52 км к востоку от эпицентра), где все постройки одноэтажные и деревянные, наблюдались возмущения в 6–7 баллов. В момент землетрясения жители находились в помещении и почувствовали мощный удар с грохотом, казалось, что «бульдозер рушит дома». При вибрации домов треснули стекла в окнах, появились трещины в печах. Внутри домов все двигалось и содрогалось: мебель, посуда, шкафы, открывались двери, падали предметы на пол и др. У одного жителя упал с тумбочки телевизор. 6-балльные макроэффекты отмечены в поселках Усть-Нера и Артык (90–160 км от эпицентра). Силой в 5 баллов землетрясение наблюдалось в поселках Нелькан и Угольное на расстоянии 180 км от эпицентра. Слабее (4 балла) это событие проявилось в поселках Томтор, Хону и Зырянка на расстоянии от 220 до 250 км. В Магаданской области очевидцы в населённых пунктах Сусуман, Сеймчан и Талая, отстоящих от эпицентра на 220–500 км, отмечали сейсмические колебания 2–4 балла. Дальше всех (610 км к юго-востоку

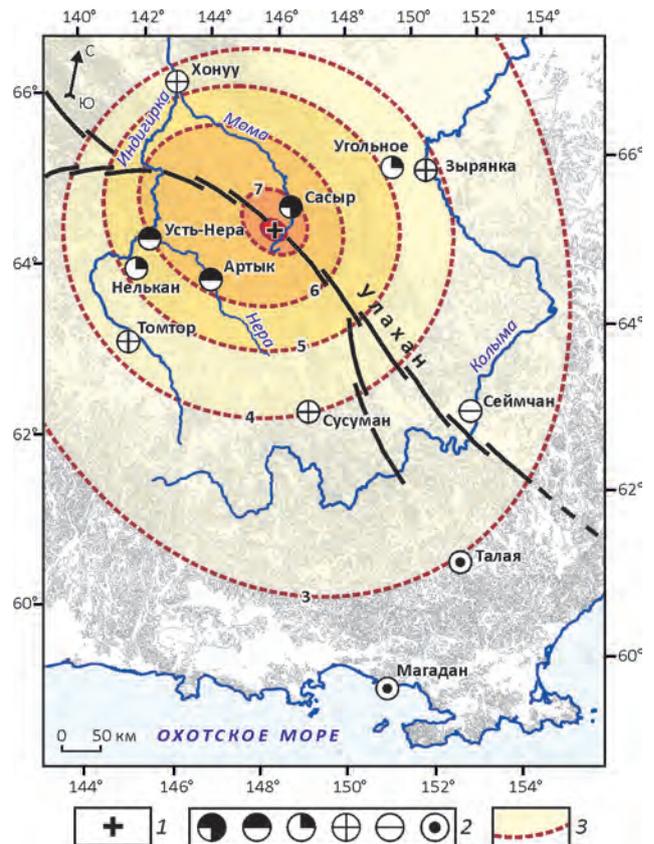


Рис. 3. Схема изосейст Улахан-Чистайского землетрясения 20.01.2013 г.:

1 – эпицентр главного толчка по инструментальным данным; 2 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64 соответственно: 7, 6, 5, 4, 3, 2; 3 – линии балльности (изосейсты); черная линия – трасса разлома Улахан

от эпицентра) этот толчок силой до 2 баллов почувствовали жители г. Магадан на верхних этажах жилых зданий. Из карты изосейст (см. рис. 3), где показана трасса разлома Улахан, следует, что затухание сейсмических воздействий вдоль разлома наблюдалось быстрее в направлении на северо-запад, чем на юго-восток. Возможно, это связано с их экранированием поперечными субширотными разрывами, развитыми на северо-западном фланге Улахана.

Движения в очаге Улахан-Чистайского толчка по данным параметров фокального механизма, приведённого в бюллетене ISC [21], произошли по типу левого сдвига, что совпадает с левобокowymi перемещениями по разлому Улахан, установленными по геолого-структурным данным [3, 4].

**Разлом Дарпир** (см. рис. 1, № 12) составляет сопряжённую динамопару с разломом Улахан и впервые был выделен А.А.Николаевым в 1958 г. Он следует

на юго-востоке региона на расстоянии более 400 км и отделяет Омuleвское поднятие от Иньяли-Дебинского синклиория. Геологическим строением этого разлома занимались многие исследователи [3, 4, 12, 14], благодаря которым была установлена его взбросо-сдвиговая кинематика. Горные породы в зоне разрыва подвержены интенсивной складчатости, сильному дроблению, рассланцеванию и милонитизации. На многих участках разлом выделяется по линейным магнитным аномалиям и резкой гравитационной ступени. Амплитуда горизонтальных перемещений по нему сравнительно невелика и варьируется в интерпретации разных авторов от 2–3 км [14] до 8–10 км [3, 12].

Оба разлома Улахан и Дарпир дешифрируются на средне- и крупномасштабных космо- и аэрофотоснимках, выделяются на топографических картах в виде прямых, протяженных линейных элементов северо-западного простирания, которые сочленяются под острым углом в 20–25°, ограничивая поднятый с амплитудой в 450–550 м Омuleвский блок палеозойских пород, развитых среди мезозойских образований (см. рис. 2). Согласно современным тектоническим представлениям, Омuleвский блок является отдельным террейном, впаиваемым в мезозойскую структурную раму в процессе коллизионных и послеколлизионных преобразований структуры Верхояно-Колымских мезозойских пород [4, 9, 12]. Мелкофокусная сейсмичность (подземные толчки происходят здесь на глубине 5–20 км) почти равномерно заполняет весь его объём, что может свидетельствовать о приповерхностной природе возникновения землетрясений и, возможно, связано с горизонтальными срывами, отделяющими данный террейн от близлежащих структур, а это подчеркивает его бескорневой характер [4, 8, 9]. На рис. 2 отражено пространственное положение главных осей (Р и Т) тектонических напряжений в фокусе Сеймчанского (1974) и Улахан-Чистайского (2013) землетрясений, указывающее на левосдвиговые подвижки в их очагах. Следует отметить, что сопряженная разрывная система Улахан–Дарпир представляет собой наиболее яркую динамопару, отражающую стиль тектонических деформаций в юго-восточной части границы между Североамериканской плитой и Охотоморским блоком. На вставке (см. рис. 2) предлагается структурно-динамическая модель Омuleвского блока, подтверждающая экструзию (выдавливание) блока к юго-востоку при сближении названных структур.

**Чай-Юреинский разлом** (см. рис. 1, № 10) протягивается в северо-западном направлении от побережья Охотского моря до р. Индигирка в виде отдельных кулис, образующих закономерный ряд, характерный для левых сдвигов (см. рис. 2), где наиболее крупную Верхненерскую впадину растяжения слагают миоценовые отложения. Разлом представляет собой зону интенсивной дислоцированности пород, которая фиксируется линейной магнитной аномалией, а в поле силы тяжести ему отвечает резкая градиентная ступень [2, 3]. В зоне

его динамического влияния произошло одно из самых крупных на северо-востоке Азии Артыкское землетрясение 1971 г. (М 6,6–6,8) с интенсивностью в эпицентре до 9 баллов. Фокальные механизмы Верхнеколымского (1970) и Артыкского (1971) землетрясений указывают на левобокковый тип движений по данному разлому [4, 8].

**Илинь-Тасский разлом** (см. рис. 1, № 6) и параллельный ему Мятисский надвиг (см. рисунки 1, № 8 и 2) являются крупными региональными структурами, которые трассируются с северо-запада на юго-восток вдоль области сочленения Индигиро-Зырянского прогиба с Илинь-Тасской складчатой зоной (Момского хребта и его орографическое продолжение – кряж Андрей-Тас). В магнитном поле вдоль Илинь-Тасского дизъюнктива фиксируются изменения рисунка магнитных аномалий, а в поле силы тяжести ему отвечает резкая гравитационная ступень. В пределах Момского хребта разлом по морфо-структурным сведениям [4, 5, 20] представляет левый сдвиг с падением на юго-запад под углом 40–60°. На его северо-западном фланге (кряж Андрей-Тас) выявлен ряд взбросов и надвигов в виде опрокидывания слоев и появления чешуйчатых структур с падением на юг-юго-запад [3, 4]. Этот разрыв образует крупную фронтальную границу, по которой древние толщи юры и мела Илинь-Тасской зоны взброшены и надвинуты на молодые кайнозойские образования Индигиро-Зырянского прогиба [3, 4, 20]. За последние 150 лет в зоне разлома наблюдались слабые тектонические движения в виде небольших подземных толчков ( $M \leq 3$ ), но в результате внезапной активизации сейсмотектонических процессов здесь случилось сильнейшее в начале XXI в. 9-балльное Илинь-Тасское (Абыйское) землетрясение 2013 г. М 6,9 [13, 20], ощущавшееся в северных районах Якутии на площади более полумиллиона квадратных километров. Стереодиаграмма механизма его очага приведена на рис. 2. Смещения в фокусе землетрясения соответствовали надвигу, что совпадает с надвиговыми подвижками, отмеченными в плоскости Илинь-Тасского разрыва по геологическим данным [3, 4].

**Структура сейсмичности.** Для изучения особенностей распределения долговременной сейсмичности в пространстве использовались данные каталогов ISC [21], а также материалы цифровых наблюдений сейсмостанций Федерального исследовательского центра единой геофизической службы РАН и его Якутского (станции Усть-Нера, Мома, Артык) и Магаданского (Сеймчан, Сусуман, Омсукчан, Омчак) филиалов, что позволило без пропусков регистрировать все землетрясения, начиная с  $M \geq 2,5$ –3 [4, 13, 20, 24]. За последние 100 лет в зоне Черского зарегистрировано более 30 тыс. местных землетрясений, которые произошли на глубине 7–30 км в пределах земной коры толщиной до 35 км [22]. Интенсивность больше десятка из них достигала в эпицентре 6–7 баллов по шкале MSK-64. Совместный анализ элементов активной тектоники и проявлений сейсмичности выявил в Яно-Индигирском (I) и

Индиги́ро-Колы́мском (II) региональных сегментах зоны Черского ряд закономерностей пространственного распределения очагов землетрясений, максимумов сейсмической активности во взаимосвязи со структурной организацией главных сейсмогенных зон (см. рис. 1).

Совокупное поле эпицентров землетрясений зоны Черского отчётливо маркирует границу Евразийской и Североамериканской литосферных плит, которая вытянута на 1500 км по простиранию при ширине до 400 км от моря Лаптевых к Охотскому морю. Легко заметить, что одна часть эпицентров группируется здесь в линейные зоны, приуроченные к конкретным разломам, например, к крупным региональным сейсмогенным разрывам, показанным на рис. 1 (Илинь-Тасский (№ 6), Адыча-Тарынский (№ 9), Чай-Юреинский (№ 10), Улахан (№ 11) и др.). Другая часть образует максимумы (скопления) с повышенной плотностью эпицентров. Для лучшего выделения их в пространстве они оконтурены изолиниями сейсмической активности (число толчков на единицу площади за определённое время). В результате на рис. 1 помечены 15 максимумов (см. рис. 1, *a-n*) в виде различно ориентированных овалов. Из них наибольшая сейсмическая активность с изолинией 0,1, принадлежит 5 таким участкам: Оленёкский (*a*), Хараулахский (*b*), Полоусненский (*c*), Андрей-Тасский (*d*) и Артыкский (*e*). В остальных уровень активности соответствует 0,05 и меньше. В пределах обозначенных максимумов, как правило, наблюдаются одно или несколько сильных землетрясений, сопровождаемых афтершоками или группами менее интенсивных толчков. Такие сгущения эпицентров в Яно-Инди́гирском сегменте чаще тяготеют к разломным узлам пересечения фронтальных тектонических структур взбросо-надвигового типа со сдвигами [6, 20]. К ним относятся Андрей-Тасский, Полоусненский и Адыча-Тарынский максимумы. Наибольшая активность характерна для Андрей-Тасского максимума, принадлежащего к одноимённому тектоническому блоку, где только в течение 1962–2013 гг. произошло 24 сильных землетрясения  $M$  5,0–6,9 [7].

В пределах Инди́гиро-Колы́мского сегмента зоны Черского, представляющего Охотский блок, который ограничен разломами Улахан (см. рис. 1, № 11), Кетандинским (№ 15) и Челомджа-Ямским (№ 17), большинство сейсмических событий локализовано в виде линейных полос, приуроченных к трассам крупных протяженных левых сдвигов (Чай-Юреинский, Улахан, Дарпир, Брюнгандинский, Кетандинский и др.) [4, 8, 20, 24]. К их зонам также приурочены овалы – максимумы сейсмичности, вытянутые вдоль их простирания. Иногда территориально эти площадки повышенной активности включают в себя сразу участки двух или трёх соседних тектонических разрывов. Примером таких образований могут служить Верхнерский (см. рис. 1, *z*), Сунтар-Хаятинский (см. рис. 1, *к*) и Челомджа-Ямский

максимумы (см. рис. 1, *n*). Подобно Яно-Инди́гирскому сегменту, перечисленные максимумы в междуречье Инди́гирка–Колы́ма объединяют эпицентры сильных землетрясений с сопутствующими толчками и являются составной частью тектонических блоков, как Верхнерский максимум, где произошло катастрофическое Артыкское землетрясение 1971 г. с серией повторных толчков [4, 13], или Улаханский максимум (см. рис. 1, *л*), локализованный внутри Омулёвского блока с крупным Сеймчанским событием 1974 г. (см. рис. 2). Более детально структура сейсмичности Охотского блока представлена в работах [6, 8].

**Сеймотектоника.** Ранее было установлено [6–8], что в сеймотектонической зоне Черского в условиях транспрессии (сжатия со сдвигом), возникших при столкновении Евразийской и Североамериканской плит, имеет место кинематическая обстановка, способствующая появлению сопряженных разнонаправленных сдвигов, развитых на северо-западе в Яно-Инди́гирском и юго-востоке в Инди́гиро-Колы́мском сегментах данного региона. При сближении в северо-восточном направлении указанных литосферных плит роль активного индентора выполнял Колымо-Омолонский блок, находящийся во фронтальной части Североамериканской плиты (см. рис. 1) [7, 20]. Под его давлением ряд террейнов различной геодинамической природы подвергались горизонтальному сжатию, при котором отдельные блоки указанных сегментов по системе сопряженных разнонаправленных сдвигов выжимались по латерали вдоль орогенного пояса соответственно к северо-западу и юго-востоку, формируя в краевых и фронтальных частях зоны Черского главные сейсмогенерирующие структуры, обладающие значительным сейсмическим потенциалом. В нашем случае перемещение тектонических блоков в Яно-Инди́гирском сегменте подтверждается смещением гранитоидов Буордахского массива [7] к северо-западу и северу в направлении хребта Полоусный и кряжа Кулар и выталкиванием Омулёвского блока на юго-восток к Охотскому побережью в Инди́гиро-Колы́мском сегменте (см. рис. 2). Эти данные совпадают с более ранними результатами изучения структур в коллизионных зонах альпийской складчатости, когда наблюдалось закономерное развитие левых и правых сдвигов, расходящихся в противоположные стороны от индентора при деформации горизонтального (латерального) выжимания [10, 23].

Представленная кинематическая модель главных сейсмогенерирующих структур зоны Черского была дополнена результатами изучения напряжённого состояния земной коры на основе метода расчёта среднего тензора сеймотектонических деформаций (СТД) [17, 18], использованного для Арктического сектора территории Якутии [2] и впервые применённого для данного региона. Основой для расчёта и анализа параметров СТД служили решения механизмов очагов более

60 местных землетрясений ( $M \geq 3,5$ ) за период 1927–2016 гг., заимствованные из международных сейсмологических центров [19, 21] и литературных источников [19]. Вычисления проводились на основе совокупности определений отдельных фокальных механизмов методом тензора сейсмического момента, а также по знакам первых вступлений объемных сейсмических волн. Выбор сейсмоактивных объемов земной коры (при условии их однородного деформирования) определялся площадным распределением эпицентров землетрясений при их глубине 20 км.

На рис. 1 и в таблице приведены горизонтальная проекция главных осей деформаций удлинения (растяжения) и укорочения (сжатия) с указанием номера области расчета СТД и классификация режимов сейсмотектонических деформаций (в плоскости земной коры), а также тектонические режимы, которым они соответствуют. В итоге из общего числа сейсмических событий было выделено 12 групп территориально близких к друг другу землетрясений с осреднением результатов по методу «узловых точек» [1]. Выявленные группы расчёта СТД (см. рис. 1, № 1–12 в квадратах и таблицу) пространственно совпадают или близки к большинству максимумов сейсмической активности (см. рис. 1, *a–n* в овалах).

На северо-западе региона в зоне перехода от губы Буор-Хая к континентальным районам проявлены три группы максимумов сейсмической активности (*a–в*), для которых получены сходные характеристики СТД (см. рис. 1, № 1–3 и таблицу) со смешанным полем тектонических напряжений (от растяжения к сжатию). Для максимума «г» в Полоусно-Дебинской складчатой системе выявлен переходный режим СТД (см. рис. 1, № 4) – от сдвига к сжатию с субгоризонтальной ориентацией главных осей деформаций, где сжимающие усилия направлены на северо-восток, что соответствует решению механизма в очаге местного сильного Иргичанского землетрясения 1962 г. [4].

В Андрей-Тасском максимуме (блоке) «д» отчетливо фиксируется режим СТД (см. рис. 1, № 5), где главный вектор сейсмотектонических деформаций сжатия ориентирован в северо-восточном направлении, как и в очаге отмеченного здесь наиболее сильного Илин-Тасского землетрясения 2013 г. [20]. Аналогичный тип СТД (см. рис. 1, № 6) характерен для Адыча-Тарынской шовной зоны (максимум «е»). Параметры фокального механизма Адычанского землетрясения 1951 г. указывают на то, что напряжения сжатия в его очаге также действовали в северо-восточном направлении.

В центральной части зоны Черского СТД (см. рис. 1, № 7 и 8) ось сжатия меняет своё простирание с северо-восточного на субширотное. Это обнаруживается для максимумов в области динамического влияния разлома Улахан «з» и Чай-Юреинской сдвиговой зоне «л», где по данным механизмов Улахан-Чистайского (2013) и Артыкского (1971) землетрясений господству-

ет сдвиговый режим СТД с субширотным сжатием и субмеридиональным растяжением. Вклад сжимающих и растягивающих усилий здесь примерно сопоставим, что выражается в пологих углах погружения главных осей напряжений.

Для динамики сейсмогенерирующих структур на юго-востоке Индигиро-Колымского сегмента (максимумы «к», «м» и «н») наиболее показательны тенденции напряженно-деформированного состояния земной коры Охотско-Кухтуйского блока (максимум «к»), где отмечается сдвиговый режим СТД (см. рис. 1, № 9). Механизм очагов местных сильных сейсмических событий 1984–1986 гг. подтверждает сдвиговый тип перемещений, под воздействием которых происходит выталкивание тектонических блоков к юго-востоку и востоку. Южное ограничение Индигиро-Колымского сегмента подвержено переходному деформационному типу СТД от вертикального режима к субширотному сжатию (см. рис. 1, № 10). Похожая система напряжений зафиксирована здесь для сильного Ямского события 2003 г.

Остальные области расчета СТД, сконцентрированные на юго-восточном фланге зоны Черского, характеризуются параметрами сейсмотектонических деформаций, направление которых не согласуется с системами напряжений в очагах сильных событий (см. рис. 1, № 11–12). Возможно, это связано с наложением деформационных полей тектонических структур Арктико-Азиатского и Охотско-Чукотского сейсмических поясов [1].

В заключение следует отметить, что параметры сейсмотектонических деформаций, рассчитанные по данным фокальных механизмов землетрясений (см. таблицу), в целом подтверждают кинематическую модель «индентора» (Колымо-Омолонский блок) и его влияние на формирование сейсмогенерирующих структур зоны Черского [5, 7, 20]. Активные сейсмотектонические процессы в земной коре протекают здесь, главным образом, в условиях единой геодинамической обстановки сжатия (см. таблицу, группы 4–12). По данным за последние 100 лет рассмотрена структура долговременной сейсмичности, где на фоне рассеянных слабых землетрясений, маркирующих границу Евразийской и Североамериканской плит, выявлено 15 участков с максимальным уровнем сейсмической активности. Эти максимумы пространственно совпадают с соответствующими им областями расчёта СТД и тяготеют к крупным тектоническим нарушениям, ограничивающим блоки земной коры.

Сравнительный анализ имеющихся сведений (кинематика разломов, сейсмичность и их пространственная зависимость, а также параметры напряжённого состояния геологической среды по расчётам СТД) выявил вдоль границы названных плит нестабильность тектонических режимов. При движении с севера-запада зоны Черского на юго-восток наблюдается изменение

## Параметры расчёта и режимы сейсмоструктурных деформаций (СТД) зоны Черского

Номер группы	Координаты узловых точек		Географическая привязка области расчёта СТД	N	$\chi$	$\omega$	$\rho$	R, км	Режим СТД	Тектонический режим
	Северная широта	Восточная долгота								
1	73,50	130,00	Усть-Ленская	4	0,83	151	21	200	Растяжение	Рифтогенез
2	71,40	127,20	Чекуровская	5	0,51	45	62	50	Сжатие	Транспрессия
3	70,50	130,00	Хараулахская	4	0,74	148	38	40	От вертикального режима к растяжению	Транстенсия
4	70,00	139,20	Полоусно-Дебинская	5	0,82	74	16	100	От сдвига к сжатию	Транспрессия
5	67,50	141,20	Андрей-Тасский блок	12	0,85	45	14	80	Сжатие	Коллизия
6	66,00	139,20	Адыча-Тарынская	5	0,80	45	11	100	Сжатие	Коллизия
7	64,50	147,50	Улахан	5	0,74	32	29	150	Сжатие	Коллизия
8	63,80	145,80	Чай-Юреинская	5	0,64	82	10	80	Сдвиг	Транспрессия
9	61,00	145,00	Охотско-Кухтуйская	4	0,83	91	23	150	Сдвиг	Транспрессия
10	59,80	150,15	Челомджа-Ямская	3	0,71	39	35	200	От вертикального режима к сжатию	Транспрессия
11	62,00	153,55	Купкинская	3	0,82	101	31	50	Косой сдвиг	Транспрессия
12	62,40	156,80	Омсукчанская	6	0,54	32	39	80	От вертикального режима к сжатию	Транспрессия

*Примечание.* N – число фокальных механизмов при расчете СТД;  $\chi$  – коэффициент интенсивности среднего механизма, отражающий степень соответствия результирующего тензора и тензора индивидуального механизма (пределы изменения:  $0 \leq \chi \leq 1$ );  $\omega$  – угол вида плоской деформации;  $\rho$  – угловое соотношение плоской/вертикальной деформации [18, 19, 21]; R – радиус области расчета СТД.

ориентации среднего вектора СТД сжатия и его длины (см. рис. 1, белая линия). Так, для Полоусно-Дебинской области вектор СТД сжатия направлен на северо-восток по азимуту  $25^\circ$ , для Андрей-Тасского блока и Адыча-Тарынской области – по азимуту  $40-45^\circ$ , для района Улахан и Чай-Юреинской области –  $100-110^\circ$  и, наконец, для Охотско-Кухтуйской и Челомджа-Ямской областей –  $80-95^\circ$ . Таким образом, происходит постепенная смена направления действия вектора сжатия с субдолготного на субширотное. В зависимости от расположения данного вектора в пространстве по отношению к разломным зонам изменяются условия взаимодействия плит и тектонический режим. Там, где длина вектора СТД сжатия наибольшая, и он направлен перпендикулярно к линии разлома, коллизийная активность тектонических процессов резко возрастает. Это отчетливо прослеживается для Андрей-Тасского блока (см. рис. 1, д и таблицу), где за 1962–2013 гг. отмечено 24 сильных землетрясения M 5,0–6,9 [7]. Учитывая этот критерий, можно обнаружить следующую зональность тектонических режимов: в Полоусно-Дебинской структуре на северо-западном фланге зоны Черского действует режим транспрессии, а кинематика разломов соответствует надвигам и сдвигам; в центре зоны (Андрей-Тасский блок и Адыча-Тарынская область) – коллизия с развитием взбросов и надвигов. К юго-востоку

(зона Улахана и Чай-Юреинская область) – коллизия и транспрессия с преобладанием сдвигов, на крайнем юго-востоке – транспрессия со сдвигами и надвигами.

Полученные данные позволяют считать наиболее потенциально сейсмоопасными блоки в центральной части зоны Черского (Андрей-Тасский, Адыча-Тарынский, Улахан и Чай-Юреинский (см. таблицу, № 5–8), для которых характерен максимальный коэффициент среднего механизма очага землетрясения  $\chi$ . Эти блоки располагаются на участке территории, испытывающей наибольшее горизонтальное сжатие со стороны Колымо-Омолонского индентора–супертеррейна, что подтверждается отмеченными здесь сильными землетрясениями. На флангах зоны Черского уровень потенциальной сейсмичности в блоках снижается в связи с уменьшением давления индентора на его краях.

Результаты настоящих исследований с применением расчётов сейсмоструктурных деформаций СТД дополнили региональную структурно-динамическую модель зоны Черского и могут использоваться для целей детального сейсмического районирования, а также современных и палеогеодинамических реконструкций.

*Исследования выполнены по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект 0381-2016-0001. По проекту РНФ № 15-17-20000 профинансированы работы по расчету СТД.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анализ* напряжённо-деформированного состояния новейших структур северо-восточного сектора Арктики / Л.П.Имаева, В.С.Имаев, В.И.Мельникова и др. // Геология и минеральные ресурсы Северо-Востока России: мат-лы VII Всерос. науч.-практич. конф., посвящённой 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. С. 124–128.
2. *Анализ* современных тектонических режимов Лаптево-морского блока (Арктический сектор территории Якутии) / Л.П.Имаева, Б.М.Козьмин, В.С.Имаев и др. // Отечественная геология. 2016. № 6. С. 91–98.
3. *Гусев Г.С.* Складчатые структуры и разломы Верхояно-Колымской системы мезозойд. – М.: Наука, 1979.
4. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмотектоника Якутии. – М.: ГЕОС, 2000.
5. *Геодинамика* отдельных сегментов литосферных плит на северо-востоке Азии / В.С.Имаев, Л.П.Имаева, К.Маккей, Б.М.Козьмин // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 1. С. 5–17.
6. *Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М.* Сейсмотектонический анализ Яно-Индибирского сегмента зоны Черского // Физика земли. 2010. № 12. С. 79–86.
7. *Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С.* Динамика очаговых зон сильных землетрясений северо-восточного фланга Момо-Селенныхских впадин // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 113–119.
8. *Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Имаев В.С.* Динамика сейсмогенных структур Индигиро-Колымского (Охотского) сегмента зоны хр. Черского // Отечественная геология. 2012. № 5. С. 55–61.
9. *Коллаж* террейнов Верхояно-Колымской орогенной области / Л.М.Парфенов, В.С.Оксман, А.В.Прокопьев и др. // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 199–254.
10. *Konn M.L.* Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизиином поясе. – М.: Научный мир, 1997.
11. *Мальков Б.И.* Схема развития юго-восточной части Яно-Колымской геосинклинальной системы // Мезозойский тектогенез. Мат-лы 7-й сессии Научного Совета по тектонике Сибири и Дальнего Востока. – Магадан, 1971.
12. *Мерзляков В.М.* Стратиграфия и тектоника Омудевского поднятия (северо-восток СССР). – М.: Наука, 1971.
13. *Современная* активность сейсмических поясов Якутии / Б.М.Козьмин, С.В.Шибяев, Л.П.Имаева и др. // Континентальный рифтогенез и сопутствующие процессы. Мат-лы II-го Всероссийского симпозиума с международным участием. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. С. 167–171.
14. *Шахтыров В.Г.* Разломные и сдвиговые морфоструктуры северо-востока СССР // Морфоструктурные исследования. Теория и практика. – М.: Наука, 1985. С. 190–194.
15. *Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов. Результаты моделирования. – Новосибирск: Наука, 1983.
16. *Шпикерман В.И.* Домеловая минерация северо-востока Азии. – Магадан, 1998.
17. *Юнга С.Л.* Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. – М.: Наука, 1990.
18. *Юнга С.Л.* О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // ДАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255.
19. *Global Centroid Moment Tensor Project.* On-line Bulletin, <http://www.globalcmt.org> (last accessed September 2015).
20. *Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М.* Structural-dynamic model of the Chersky seismotectonic zone (continental part of the Arctic–Asian seismic belt) // Journal of Asian Earth Sciences. 2016. Vol. 116. Pp. 59–68.
21. *International Seismological Centre.* On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>, Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom (last accessed January 2017).
22. *Mackey K.G., Fujita K., Ruff L.J.* Crustal thickness of northeast Russia // Tectonophysics. 1998. Vol. 284. Pp. 283–297.
23. *Moore E.M., Twiss R.J.* Tectonics / W.H. Freeman and Company. New York, 1995.
24. *Seismotectonics* of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia / K.Fujita, B.M.Kozmin, K.Mackey et al. // Geology, Geophysics and Tectonics of Northeastern Russia: a Tribute to Leonid Parfenov. Stephan Mueller Spec. Publ., 2009. Vol. 4. Pp. 117–145. Doi 10.5194/smsps-4-117-2009.
25. *Woodcock N.J., Fischer M.* Strike-slip duplexes // Journal of Structural Geology. 1986. № 8. Pp. 725–735.