

Сильное Улахан-Чистайское землетрясение 20 января 2013 года ($M_s = 5.7$) в зоне влияния системы разлома Улахан на Северо-Востоке России*

В. С. Имаев^{1,2}, Л. П. Имаева¹, Б. М. Козьмин²

¹ Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128

² Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39

Для цитирования: Имаев, В. С., Имаева, Л. П., Козьмин, Б. М. (2020). Сильное Улахан-Чистайское землетрясение 20 января 2013 года ($M_s = 5.7$) в зоне влияния системы разлома Улахан на Северо-Востоке России. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (4), 740–759. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.408>

Рассматривается сильное Улахан-Чистайское землетрясение 2013 г., произошедшее в сеймотектонической зоне Черского (СЗЧ), занимающей континентальную часть Арктико-Азиатского сейсмического пояса и маркирующей границу Евразийской и Североамериканской литосферных плит на северо-востоке Азии. По наблюдениям сети цифровых сейсмостанций оценивалось пространственное положение этого события. Структурно-тектонические особенности и глубинное строение территории выявлялись на основе геолого-структурных данных, а напряженное состояние земной коры и структура полей тектонических напряжений оценивались по решениям фокальных механизмов землетрясений. Эпицентр Улахан-Чистайского землетрясения тяготеет к области влияния одного из главных разрывных нарушений СЗЧ на северо-востоке Якутии — разлому Улахан. С использованием данных мировых сейсмологических агентств выполнен сравнительный анализ найденных параметров эпицентра (координаты, энергетическая характеристика, глубина очага и др.), подтвердивших их хорошую сходимость. На основе опроса местного населения составлена карта распределения сейсмических воздействий на земной поверхности (карта изосейст). В результате на площади в 300 тыс. км² в Республике Саха (Якутия) и Магаданской области выделен ряд сейсмоопасных участков от 2 до 8 баллов (шкала MSK-64). Приводится статистика сейсмологических наблюдений в зоне влияния Улахана в прошлом и настоящем времени. За почти 50 лет инструментальных наблюдений в пределах его разломной зоны на глубинах 7–30 км зарегистрировано свыше 15 тыс. локальных событий. Показано, что разлом Улахан относится к крупным региональным структурам с левосдвиговой кинематикой, способным генерировать интенсивные (8 и более баллов) подземные толчки типа Улахан-Чистайского в условиях горизонтального сжатия. Отмечено согласие между характером подвижек в фокусе названного землетрясения и элементами структуры зоны самого разлома. Предложена структурно-динамическая модель Улаха-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00062, проекта ИЗК СО РАН (№ 346-2018-0001) и ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0001), а также программы Президиума Академии наук Республики Саха (Якутия) по комплексному изучению ее территории.

на, связанная с обстановкой транспрессии при сближении Евразийской и Североамериканской литосферных плит.

Ключевые слова: сейсмичность, фокальные механизмы землетрясений, активные разломы, палеосейсмодислокации, литосферные плиты на северо-востоке Азии, экстружия тектонических блоков.

1. Введение

Комплексные геолого-геофизические исследования в XX — начале XXI в. выявили на территории северо-востока Азии протяженный Арктико-Азиатский сейсмический пояс (ААСП) (Имаев и др., 2000; Имаева и др., 2011; Maskey et al., 2007; Fujita et al., 2009), геодинамические процессы в котором на его континентальном отрезке (сеймотектоническая зона Черского) указывают на значительные деформационные преобразования земной коры в зоне взаимодействия крупных литосферных плит (Североамериканской, Евразийской и Охотоморской) (рис. 1). В ААСП в сеймотектоническом плане выделяется несколько крупных региональных структур, представленных землетрясениями Лаптевоморской, Хараулахской, Адыча-Тарынской, Улаханской, Кетандино-Ульбейской и других шовных зон, разграничивающих названные литосферные плиты (рис. 1), и ряд меньших локальных зон, разделяющих плиты на тектонические блоки (террейны) (Парфенов и др., 2001). Развитие в их пределах систем сейсмогенерирующих разломов, которые маркируют эти зоны взаимодействия, обусловлено определенным типом напряженного состояния земной коры (Имаев и др., 2000; 2009; Козьмин и др., 2001). Сводный анализ проявлений сейсмичности в регионе по данным мировой сети инструментальных наблюдений IRIS, а также сведений, принадлежащих филиалам Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН), во взаимосвязи с активной тектоникой составляет одну из задач настоящего исследования. Кроме того, на основе комплекса сеймотектонических (Имаев и др., 2000; Имаева и др., 2017) и геолого-структурных (Парфенов и др., 2001) данных на примере детальной характеристики Улахан-Чистайского землетрясения 2013 г. рассматривается динамика сейсмогенных разрывов в юго-восточной части СЗЧ и структурно-динамическая модель для одного из генеральных разломов Улахан в континентальной части ААСП.

2. Методика исследований и фактический материал

Геодинамическая обстановка центральной части СЗЧ изучалась на основе комплекса геолого-геофизических данных с целью выявления современной тектонической активности во взаимосвязи с местной сейсмичностью. Для анализа структуры эпицентральных полей землетрясений были построены разномасштабные карты эпицентров. При этом использовались каталоги и базы данных по наблюдениям сейсмостанций Якутского и других филиалов ФИЦ ЕГС РАН (Gsrar.ru, 2020). Сеть цифровых станций была оборудована американской (IRIS-STS-1, PAR-4CHKS-2000) и российской (SDAS-СМЗ-ОС, Байкал СМЗ-КВ) аппаратурой, что позволяло регистрировать на континентальной части ААСП все сейсмические события с $M_s \geq 3$. При определении параметров эпицентров землетрясений при-

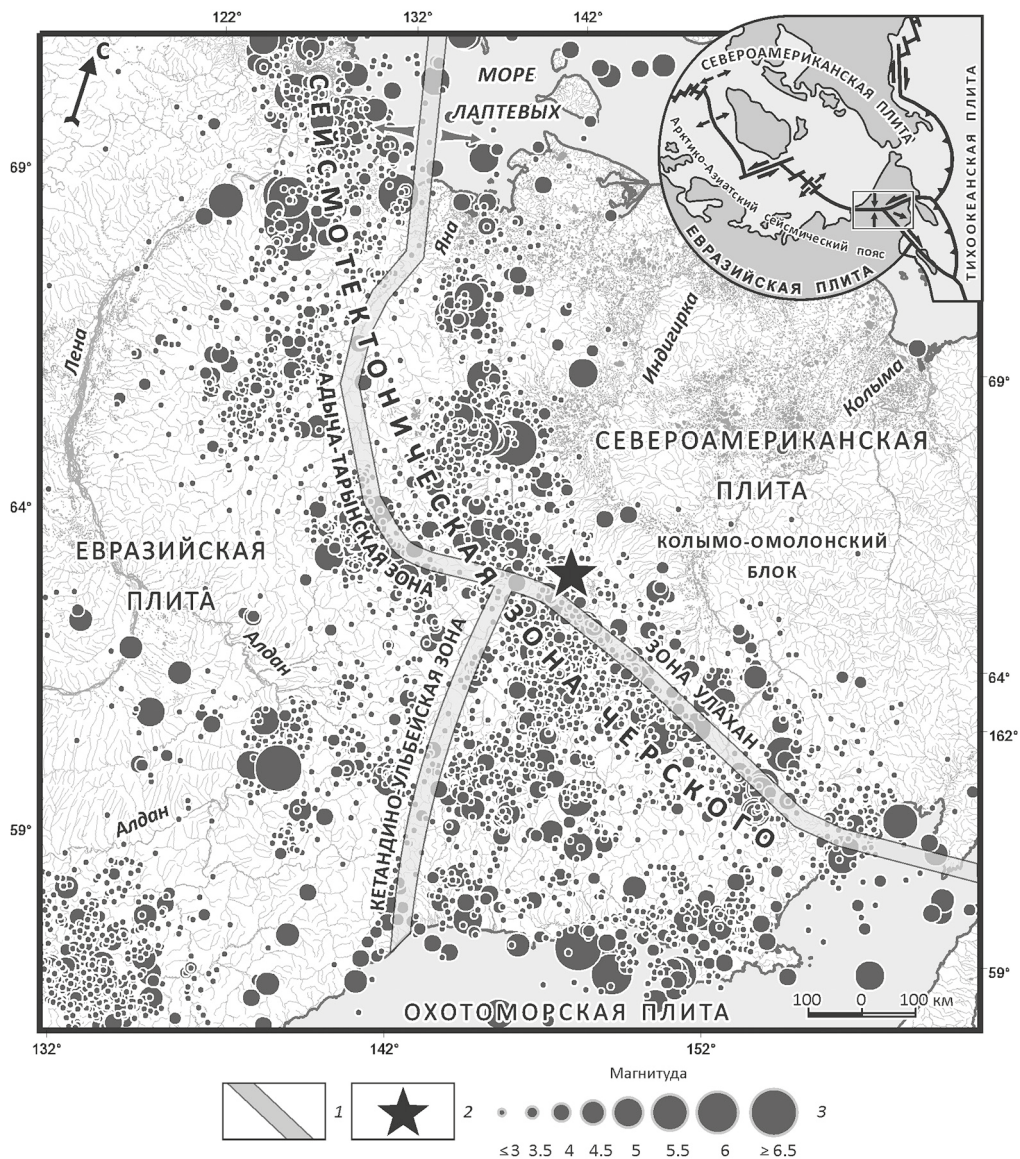


Рис. 1. Схема эпицентров землетрясений континентальной части Арктико-Азиатского сейсмического пояса (район исследований помечен прямоугольником во вставке):

1 — зона динамического влияния активных разломов; 2 — эпицентр Улахан-Чистайского землетрясения 20.01.2013 ($M_s = 5.7$); 3 — эпицентры землетрясений соответствующей магнитуды.

Схема составлена по материалам Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН, ЕГС РАН, ISC, NEIC

влекались специальные компьютерные программы, в их числе программа HYP2DT (Michigan University, USA); WSG (Россия) и др. (Fujita et al., 2009; Красилов и др., 2006). Базы данных также пополнялись сведениями из международных бюллетеней ISC, NEIC (www.isc.ac.uk, 2020) и каталогов землетрясений ФИЦ ЕГС РАН. Напряженное состояние земной коры определялось с помощью стереограмм фокальных механизмов землетрясений по материалам первых вступлений объемных сейсми-

ческих волн, а также на основе заимствованных из других источников параметров механизмов очагов (Global Centroid Moment Tensor (CMT) Catalog Search (www.globalcmt.org, 2020)). При сопоставлении на разных фазах единого цикла деформаций в мезозое, мезозое-кайнозое были реконструированы тектонические напряжения по геолого-структурным наблюдениям (элементы залегания трещиноватости, слоистости и ориентации плоскостей сместителей (Николаев, 1992; Имаев и др., 1990; 2000), а в современное время — по параметрам механизма очагов сильных землетрясений (Козьмин, 1984; Fujita et al., 2009).

3. Сеймотектонические особенности территории исследований

Северо-Восток России, в том числе северные и северо-восточные районы Якутии, является зоной повышенной сейсмической опасности, в которой неоднократно происходили сильные и катастрофические землетрясения с интенсивностью в эпицентре до 6–10 баллов по шкале MSK-64 (Медведев и др., 1965). Здесь известны пять Булунских событий 1927–1928 гг. с магнитудой $M_s = 5.6–6.8$ в Северном Верхоянье, Иргичанское землетрясение 1962 г. с $M_s = 5.8$ вблизи хр. Полоусного, Адычанский толчок 1951 г. с $M_s = 6.4$ в Верхнеадычанской впадине, Артыкское землетрясение 1971 г. с $M_s = 6.6$ в Верхненерской впадине, крупнейшие подземные толчки (Андрей-Тасский, Илин-Тасский и Улахан-Чистайский) начала нашего столетия в хребтах Черского и Момском в 2008–2013 гг. с $M_s = 5.7–6.9$ и др. За 60-летний период инструментальных наблюдений на всей этой территории зафиксировано около 40 тыс. близких землетрясений (Козьмин и др., 2001). Структура их эпицентральных полей крайне неоднородна: на одних участках имеет место скопление эпицентров, на других они отсутствуют, хотя в целом составляют единую дугообразную полосу, простирающуюся от моря Лаптевых к Охотскому морю (рис. 1).

Наибольшая концентрация подземных толчков наблюдается в сеймотектонической зоне Черского, включающей ряд тектонических швов. К самым активным относятся зоны Хараулаха в Северном Верхоянье, Илин-Тасская (Момский хр.) и сдвиговая система Улахан (хр. Черского) с высоким уровнем сейсмической опасности, где уже были катастрофические события с интенсивностью 8–9 и более баллов. Именно они являются главными индикаторами высокой сейсмической и тектонической активности крупных глубинных разломов СЗЧ. Подвижность таких систем в кайнозое устанавливалась по «облаку» эпицентров и наличию палео- и современных дислокаций, сопровождающих их зоны влияния. Для выявления разломных зон также использовались морфотектонические особенности современного рельефа (Имаев и др., 1990), как, например, выраженность на аэрофото и космоснимках, приспособление к трассам разломов или смещение ими гидросети, трансформация отдельных форм рельефа (искажение, искривление или образование кулис и др.), а также зависимость от ориентации тектонических напряжений, действующих в земной коре. В итоге для выявления сеймотектонических связей между сейсмичностью и «живой» тектоникой была построена схема разломов континентальной части Арктико-Азиатского сейсмического пояса (рис. 2). Для оценки напряженного состояния земной коры на схеме приведена кинематика движений по разломам (Имаев и др., 1990; 2000). Эта схема дополнена также стереограммами фокальных механизмов отмеченных здесь сильных землетрясений. Выделено семь

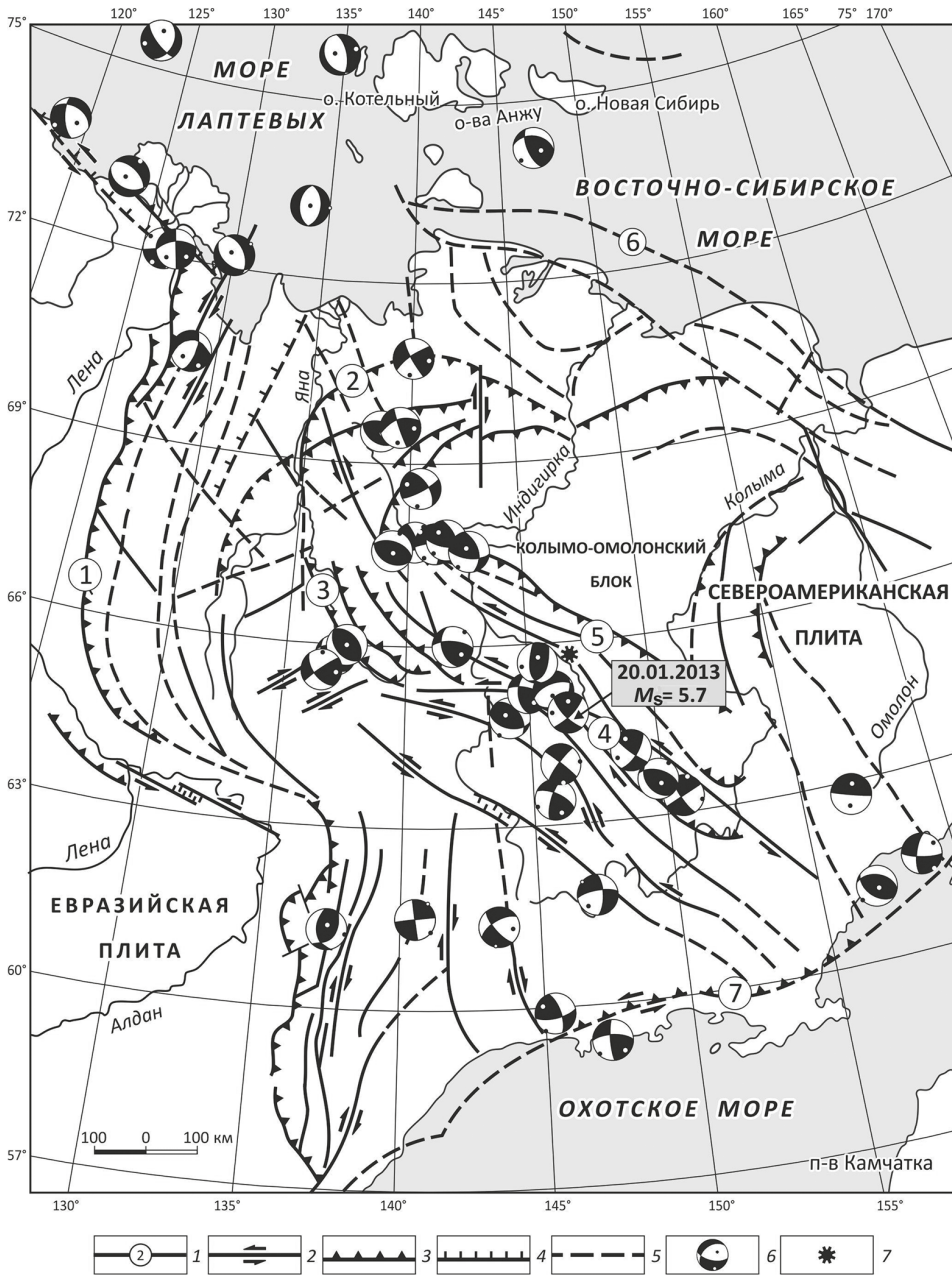


Рис. 2. Схема разломов континентальной части Арктико-Азиатского сейсмического пояса (Гусев, 1979; Имаев и др., 2000; Imaeva et al., 2016) с изменениями и дополнениями:

1 — шовные зоны (их нумерация в кружках: 1 — Верхоянская, 2 — Полоусненская, 3 — Адыча-Тарынская, 4 — сдвиговая система разломов Улахан, 5 — Илин-Тасская, 6 — Южно-Анжуйская, 7 — Челомджа-Ямская); 2-5 — кинематика активных разломов (2 — сдвиги; 3 — надвиги и взбросы; 4 — сбросы; 5 — предполагаемые разломы); 6 — фокальные механизмы землетрясений (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черные точки) и растяжения (белые точки); 7 — вулкан Балаган-Тас

крупных шовных зон протяженностью до 100–500 км, где к самым сейсмогенным отнесены сдвиговая система Улахан (рис. 2, № 4) и Илин-Тасская (рис. 2, № 5). Легко заметить, что в указанных шовных зонах фиксируется наибольшая плотность эпицентров землетрясений, из них до 80 % наиболее сильные (свыше 20).

Напряженное состояние земной коры определялось по параметрам фокальных механизмов землетрясений, возникших во фронтальной зоне взаимодействия Колымо-Омолонского блока Североамериканской плиты с Евразийской плитой (рис. 1 и 2). Для сеймотектонической зоны Черского (СЗЧ) характерно, что все подземные толчки происходят в обстановке устойчивого северо-восточного сжатия. Напряжения сжатия в фокусе землетрясений близгоризонтальны (углы падения 3–44°), а растяжения как горизонтальны, так и близвертикальны к земной поверхности (углы падения 2–85°). Названная ориентация осей напряжений в очагах землетрясений преобладает на всем протяжении СЗЧ, а подвижки в их очагах соответствуют сдвигам, взбросам и надвигам. Сочетание сдвигов и сбросов здесь минимально, как и реликты кайнозойского вулкана Балаган-Тас и не влияют на общую картину распределения тектонических напряжений. При этом кинематика движений в зонах разломов по геолого-структурным сведениям (Гусев, 1979; Имаев и др., 2000) идентична подвижкам в очагах землетрясений по сейсмологическим данным. Таким образом, сеймотектонические процессы в зоне взаимодействия Евразийской и Североамериканской плит на северо-востоке Азии протекают в условиях горизонтального сжатия по системе генеральных сдвигов, сопряженных с краевыми надвигами и взбросами.

4. Улахан-Чистайское землетрясение 20.01.2013

За последний 20-летний период инструментальных наблюдений за сейсмичностью в северо-восточной Якутии произошла замена: вместо старых аналоговых записей землетрясений на фотобумагу впервые появилась цифровая система региональных сейсмостанций с регистрацией на компьютер. С помощью этих сетей, принадлежащих Якутскому и Магаданскому филиалам ФИЦ ЕГС РАН, было зафиксировано немногим более 25 тыс. местных сейсмических событий. Они, а также эпицентр исследуемого Улахан-Чистайского землетрясения 2013 г., пространственно тяготеют к сеймотектонической зоне Черского в пределах континентальной части ААСП, вытянутой от губы Буор-Хая моря Лаптевых до Охотского побережья. Его местоположение показано на рис. 1 и 2. По данным ISC (International Seismological Center), названное землетрясение было зарегистрировано на 640 сейсмических станциях мира. Сведения о его параметрах, полученных разными сейсмологическими агентствами, представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, координаты эпицентра Улахан-Чистайского землетрясения, определенные разными сейсмологическими центрами, совпадают, что свидетельствует о надежности полученного результата. Глубина гипоцентра $h = 15$ км (табл. 1) по данным Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН практически близка к оценкам h остальных мировых центров. Поэтому очаг землетрясения располагается в средней части земной коры, имеющей здесь мощность 35 км (Mackey et al., 1998). Максимальная магнитуда M_s , определенная по вертикальной компоненте поверхностных волн на 92 сейсмических станциях, составляет 6.1 (агентство ВJI, табл. 1).

Таблица 1. Основные параметры Улахан-Чистайского землетрясения 20 января 2013 г. с $Kp = 14.4$ ($M_s = 5.7$) по данным Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН в сопоставлении с определениями других агентств (www.isc.ac.uk, 2020)

Агентство	t_0 , час./мин./сек.	δt° , с	Гипоцентр						Магнитуда (М) Энергетический класс (Кр)
			φ° , N	$\delta\varphi^\circ$	λ° , E	$\delta\lambda^\circ$	h , км	δh , км	
ЯФ ФИЦ ЕГС РАН	10/48/47.3	0.2	64.89	0.01	146.56	0.03	15	10	$Kp = 14.4$
MOS	10/48/45.7	0.9	64.83	0.08	146.54	0.04	12		$MS = 5.5/92$, $mb = 5.7/161$
ISC	10/48/47.3	0.4	64.81	0.03	146.55	0.03	10.5 11*	2.4	$Ms = 5.5/569$, $mb = 5.7/640$
IDC	10/48/45.5	0.3	64.80	0.09	146.61	0.08	0.0		$ML = 5.1/3$, $MS = 5.2/39$, $mb = 5.0/42$
NEIC	10/48/47.5	0.1	64.84	0.03	146.50	0.02	12		$MS = 5.5/295$, $Mw = 5.5$, $mb = 5.7/298$
BJI	10/48/45.0		64.73		146.60		10		$Ms = 6.1/92$, $mb = 5.3/63$
GCMТ	10/48/49.5	0.1	64.81	0.15	146.64	0.10	22.7	0.5	$Mw = 5.6/141$

Примечание: Агентства: ЯФ ФИЦ ЕГС РАН — Якутский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН; MOS — Московское агентство; ISC — Международный сейсмологический центр; IDC — корпорация международных данных; NEIC — Национальный информационный центр землетрясений; BJI — Китайский сетевой центр землетрясений; GCMТ — Глобальный центр момента центроида.

t_0 — время возникновения события; φ и λ — широта и долгота эпицентра; h — глубина очага; ошибки в их определении соответственно: δt° , $\delta\varphi^\circ$, $\delta\lambda^\circ$ и δh .

* $h = 11$ определена по глубинной pP -фазе сейсмических волн.

В графе магнитуда: числитель обозначает значение величины M , знаменатель — количество станций, участвовавших в ее определении.

Другие расчеты этой же магнитуды соответствуют $M_s = 5.5$ (наблюдения 569 станций, агентство ISC). Величина моментной магнитуды $M_w = 5.6$ была получена по данным 141 станции (агентство GCMТ). Используя уравнение макросейсмического поля (Козьмин, 1984)

$$I_0 = 1.5M - 3.2 \lg h + 2.7,$$

рассчитаем интенсивность сотрясений в эпицентре I_0 для указанных трех магнитуд и глубине очага $h = 11$ км (табл. 1, агентство ISC), найденной по глубинной pP -фазе сейсмических волн. В итоге получаем три величины интенсивности данного толчка в эпицентральной зоне: $I_0 = 8.5, 7.8, 7.6$ балла или в среднем 8 баллов (шкала MSK-64) (Медведев и др., 1965).

Согласно опросам местного населения, землетрясение ощущалось в трех северо-восточных районах Республики Саха (Якутия) (Оймяконском, Момском и Верхнеколымском), а также на юге Магаданской области на площади почти

в 300 тыс. км². Его воздействия почувствовали жители 12 населенных пунктов. Эти сведения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Макросейсмические сведения о Улахан-Чистайском землетрясении 20 января 2013 г. в 10 час. 48 мин. с $K_r = 14.4$, $M_s = 5.7$ (список населенных пунктов, где оно ощущалось)

№	Название пункта	Δ , км	I, балл	φ° , N	λ° , E
1	Сасыр	52	6–7	65.16	147.08
2	Артык	95	6	64.18	145.13
3	Усть-Нера	160	6	64.57	143.23
4	Нелькан	183	5	64.18	143.05
5	Угольное	183	5	65.74	149.72
6	Зырянка	228	4	65.74	150.86
7	Сусуман	228	4	62.78	148.17
8	Томтор	232	4	63.29	143.18
9	Хону	250	4	66.47	143.22
10	Сеймчан	380	3	62.93	152.38
11	Талая	500	2–3	61.13	152.40
12	Магадан	610	2	59.57	150.78
13	Куберганя	343	не ощущалось	67.77	144.48
14	Белая Гора	415	не ощущалось	68.53	145.19

Примечание: Δ — эпицентральный расстояние, км; I — интенсивность сотрясений в баллах (Медведев и др., 1965) в данном населенном пункте; φ и λ — координаты пункта.

Эпицентр Улахан-Чистайского землетрясения локализован вблизи расположения палеосейсмодислокации «Ерюн-Тас-Тах» (прил. 5.1²), возникшей примерно 0.5–1.5 тыс. лет назад после древнего землетрясения с $M \geq 7.5$ (Важенин, 1992; Имаев и др., 2000). Следы этого события до сих пор видны на местности и закартированы в виде обширного роя сейсмогравитационных обвалов и оползней на площади в несколько десятков кв. км. Из них особенно впечатляет обвальная плотина высотой до 50 м, которая перекрыла долину одноименного ручья (правого притока р. Тирехтях, бассейн р. Момы), после чего образовалось озеро, которое позднее было спущено из-за прорыва плотины (Гусев, 1979; Важенин, 1992; Имаев и др., 2000). Фото данной сейсмогенной плотины приведено в прил. 5.1¹ (а) и (б), а разрез через нее показан в прил. 5.1 (в) (Важенин, 1992). Упомянутый обвал хорошо сохранился и отчетливо виден в поисковой системе Google. Примечательно, что рассма-

¹ Здесь и далее приложения 5.1–5.3 можно найти по электронному адресу: <https://escjournal.spbu.ru/article/view/4143/6787>. Приложения даны в авторской редакции.

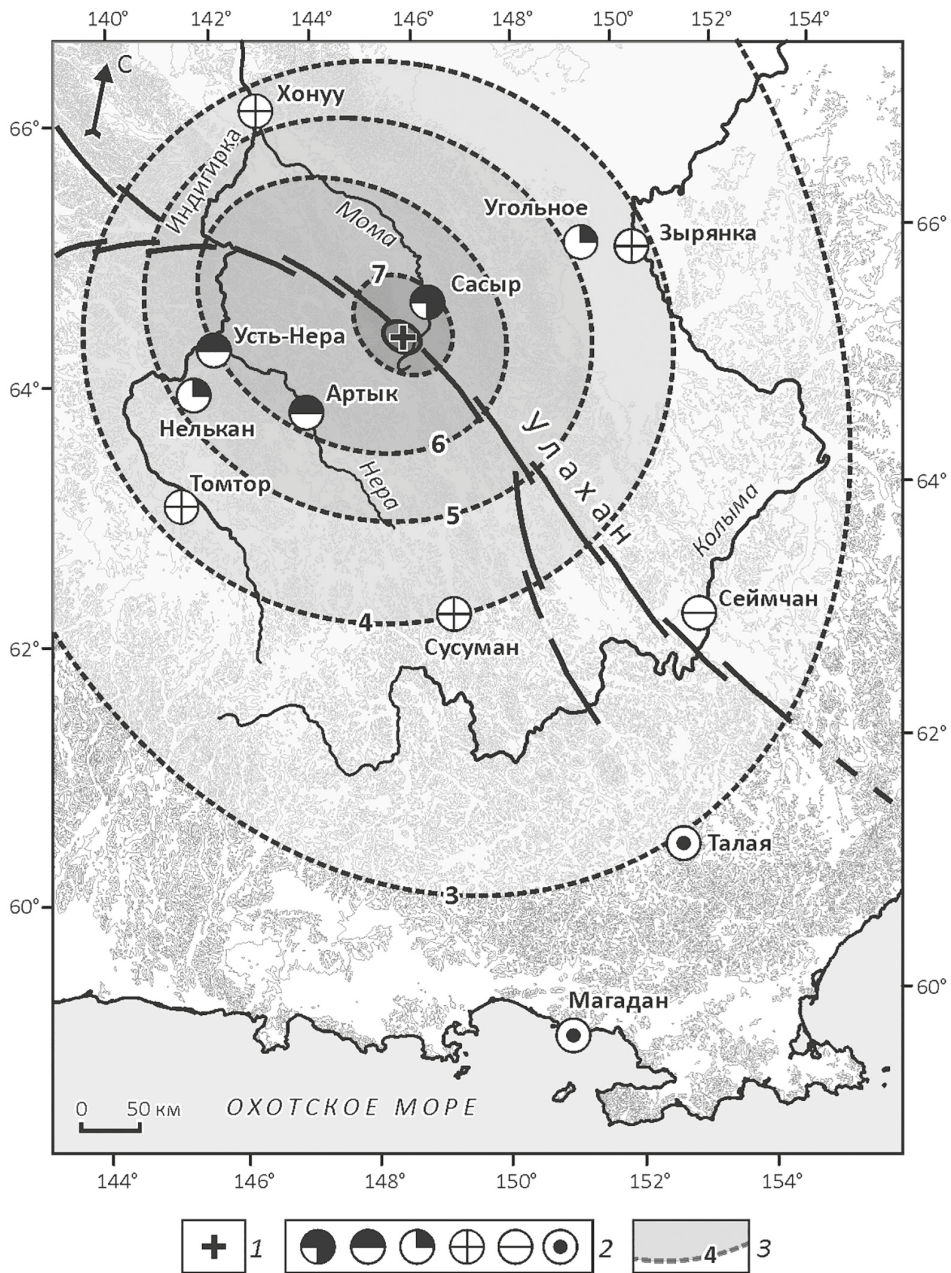


Рис. 3. Схема изосейст Улахан-Чистайского землетрясения 20.01.2013 ($M_s = 5.7$):

1 — эпицентр главного толчка по инструментальным данным; 2 — интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64 (соответственно 7, 6, 5, 4, 3, 2) (Медведев и др., 1965); 3 — линии балльности (изосейсты); утолщенная линия — трасса разлома Улахан

триваемый нами толчок выявлен рядом с этим древним обвалом и подтверждает долговременную мобильность разлома Улахан.

Отдельные признаки такой активизации наблюдались и в нашем случае в эпицентральной зоне Улахан-Чистайского события. Особенно ярко они проявились на участке, расположенном вдоль террасы ручья Джопкачан (левый приток р. Тирехтях, бассейн р. Момы), по которой был проложен временный автотрассик между поселками Сасыр и Усть-Нера в 14 км к северо-западу от эпицентра. Как отметили водители фур, проезжавшие здесь до Нового года, 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 там, где ее пересекал разлом. Они появились после землетрясения и были заполнены снегом с водой, при этом вода была выдавлена при смещении грунта. На основе опроса местного населения по телефону, электронной почте и интернет-сообщений и сведений из газет была составлена карта изосейст (рис. 3).

В ближайшем к эпицентру селе Сасыр (52 км к NE от эпицентра), где все постройки одноэтажные и деревянные, наблюдались возмущения в 6–7 баллов. В момент землетрясения жители почувствовали мощный удар с грохотом. Казалось, что «бульдозер рушит дома». От страха многие в панике выбегали на мороз. Внутри домов все двигалось и содрогалось: мебель, посуда, шкафы, открывались двери, падали предметы на пол и др. У одного жителя упал с тумбочки телевизор. От вибрации в отдельных домах треснули стекла в окнах и появились трещины в печах. Положительным фактором для жителей села, где дома построены на слабых болотистых грунтах в долине р. Момы, явилось возникновение подземного толчка в зимний период, так как летом макроэффекты при оттайке грунтов могли быть по крайней мере на один балл выше.

Шестибалльные сотрясения отмечены в поселках Усть-Нера и Артык (90–160 км к SW от эпицентра). Наблюдался испуг большинства населения. Особенно сильно «тряска» в сопровождении глухого гула наблюдалась в каменных 2–5-этажных домах пос. Усть-Нера. При первом ударе все почувствовали резкое колебание стен и раскачивание зданий. При дрожании домов был слышен звон посуды и оконных стекол, открывались и закрывались двери шкафов, перемещалась мебель, скрипели диваны и качались висячие предметы. В стыках стен появились микротрещины. Наблюдался испуг домашних животных. В то же время в деревянных одноэтажных домах поселка ощущались сотрясения меньшей интенсивности.

С силой в 5 баллов землетрясение наблюдалось жителями деревень Нелькан и Угольное на расстоянии 180 км от эпицентра. Слабее (4 балла) это событие почувствовали жители поселков Томтор, Хону и Зырянка на расстоянии от 220 до 250 км. В Магаданской области очевидцы в населенных пунктах Сусуман, Сеймчан и Талая, отстоящих от эпицентра на 220–500 км, отмечали сейсмические воздействия в 2–4 балла. Дальше всех (610 км к SE от эпицентра) толчок заметили жители г. Магадана на верхних этажах жилых зданий с силой до 2 баллов.

Из карты изосейст (рис. 3), где показана трасса Улахана, следует, что затухание сейсмических воздействий к NW по простиранию разлома происходило быстрее, чем в направлении SE. На это указывают данные из табл. 2, где в г. Магадане (610 км к SE от эпицентра) наблюдались сотрясения в 2 балла, в то время как в пос. Бата-

гай на таком же расстоянии к NW землетрясение не ощущалось вовсе. Возможно, это связано с экранированием сейсмических колебаний поперечными локальными разломами, развитыми на северо-западном окончании Улахана (рис. 2).

Для Улахан-Чистайского землетрясения имеются три решения механизма очага по методу тензора сейсмического момента, приведенного в Бюллетене ISC, выполненные разными агентствами. Их параметры и стереограммы представлены соответственно в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3. Параметры механизма очага Улахан-Чистайского землетрясения 20 января 2013 г. по данным мировых сейсмологических агентств (www.isc.ac.uk, 2020)

Агентство	t ₀ , час./мин./сек.	h, км	Магнитуды			Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
			MS	Ms	Mw	T		N		P		NP1			NP2		
						PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
MOS	10/48/45.7	12	5.5			23	360	67	180	0	90	43	74	163	137	74	17
NEIC	10/48/47.5	12		5.5	35	356	54	166	5	263	33	62	157	135	70	30	33
GCMT	10/48/49.5	22.7			5.6	35	356	52	149	13	257	31	55	163	131	76	36

Примечание: T, N, P — напряжения растяжения, промежуточное и сжатия соответственно; PL — угол падения, AZM — азимут простираия; STK — азимут простираия плоскости разрыва, DP — угол наклона, SLIP — угол скольжения.

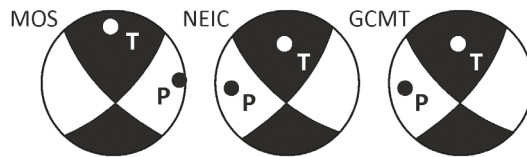


Рис. 4. Стереограммы механизма очага Улахан-Чистайского землетрясения 20.01.2013 с Ms=5.7 (P — положение оси сжатия, T — оси растяжения) по данным разных агентств: MOS — Moscow; NEIC — National Earthquake Information Center; GCMT — Global Centroid Moment Tensor

Сопоставляя эти три решения, можно отметить, что все рассчитанные параметры фокального механизма с небольшими вариациями практически идентичны и указывают на уверенный тренд однотипных подвижек в очаге, соответствующий левому сдвигу. Действительно, оси главных снимаемых напряжений сжатия (P) действовали близгоризонтально (угол наклона к горизонту 0–13°) с погружением в субширотном направлении (азимут 263–270°), а оси главных снимаемых напряжений растяжения (T) — субдолготно (азимут погружения 270–356°) под углом в 23–35°. Плоскости сместителя в очаге были субвертикальны: для плоскости разрыва NP1 угол наклона составлял 55–74° с простираием ее на северо-восток (азимут 31–43°), а плоскость NP2 была наклонена под углом 70–76° и ориентирована на юго-восток (азимут 131–137°). Эти параметры были сопоставлены с морфо-

кинематической характеристикой разлома Улахан, к которому приурочен эпицентр землетрясения. Выявилась их полная аналогия, так как по геолого-структурным данным (Имаев и др., 1990; 2000) установлено, что разлом Улахан имеет NW-SE-простираение (азимут 280–320°), а поверхность его разрыва — близвертикальна (угол наклона 75–90°). Геометрия разлома с образованием на отдельных участках левосторонних кулис, где возникли мини-впадины pull-apart, подобные Бугчанской, подтверждает его кинематику, соответствующую левому сдвигу (Мерзляков, 1971; Имаев и др., 1990; 2000). Движения вдоль северо-восточного крыла разлома Улахан, в том числе в момент Улахан-Чистайского толчка 2013 г., «выжимают» гранитоиды Буордахского массива к северу и северо-западу, способствуя поднятию массива с самой большой горной вершиной на северо-востоке Азии пиком Победы свыше 3000 м. Эти перемещения наглядно подтверждаются смещением аллювиальных отложений в виде «дуги» (помечена микроточками), отдешифрованной во фронтальной части массива в системе Google и изогнутой к северу и северо-западу (прил. 5.2).

Подобное развитие разломов типично для многих коллизионных зон и изучено на структурах, возникающих при деформации горизонтального (латерального) выжимания в Альпийско-Гималайском поясе (Копп, 1997).

4. Структурно-динамическая модель зоны влияния разлома Улахан

В структурно-тектоническом плане вся сейсмотектоническая зона Черского (рис. 1) рассматривается нами вслед за Ноклебергом и др. (Nokleberg et al., 1998) и Парфёновым и др. (2001) как Колымо-Омолонский супертеррейн, который объединяет несколько перикратонных террейнов (блоков), примыкающих с востока к Верхоянскому складчато-надвиговому поясу (рис. 2, № 1), а также ряд террейнов, расположенных к северо-западу от Колымо-Омолонского блока (Шахтыров, 1985; Парфенов и др., 2001). Упомянутые террейны-блоки разграничиваются между собой системой разновозрастных тектонических нарушений, которые активны в современное время в зоне Черского (Гусев, 1979; Имаев и др., 2000; Fujita et al., 2009). Они представлены на рис. 2, где также показаны фокальные механизмы наиболее сильных землетрясений СЗЧ и местоположение Улахан-Чистайского события 2013 г. Современная активизация большинства рассматриваемых разломов происходит в области горизонтального сжатия, существующей между крупными Евразийской и Североамериканской литосферными плитами на северо-востоке Азии (Имаев и др., 2000; Fujita et al., 2009; Imaeva et al., 2016).

Остановимся на характеристике генерального разлома Улахан, который в сейсмотектонической зоне Черского влияет на формирование современного рельефа и является одним из основных сейсмогенерирующих структур. Именно к нему приурочен эпицентр рассматриваемого Улахан-Чистайского землетрясения 2013 г. Для отрезка разлома Улахан, ограничивающего Омудевский блок с северо-востока (рис. 5), была оценена величина его горизонтальных перемещений, которые считывались с крупномасштабных топографических карт (М. 1:100 000) по однотипным смещениям небольших притоков, пересекающих плоскость разлома и заложенных перпендикулярно его простираению. Более наглядно в современном рельефе это фиксируется в бассейне р. Колымы, где Улахан пересекает верховья рек Рассоха,

Омулевка и Дарпир-Юрях и систематически смещает их русла влево вдоль трассы разлома. По этим данным магаданскими геологами (Шпикерман, 1998) при построении ими геологической карты Омулевского блока была оценена суммарная величина горизонтального смещения в зоне влияния Улахана, которая составила 23–24 км. Подобная подвижка в 24 км фиксируется также при определении ее по ширине понижения в рельефе, которому соответствует молодая впадина pull-apart между реками Сумун и Улахан-Нагаин (Имаев и др., 1990; 2000). Время начала горизонтальных подвижек здесь определяется в первом приближении как среднеплиоценовое, когда, по мнению большинства геоморфологов (Fujita et al., 2009), была заложена сеть водотоков района, т. е. около 3.4 млн лет тому назад. В этом случае средняя скорость движения по разлому может составлять около 0.7–0.8 см/год. Распределение географии подвижек перечисленных участков гидросети по Улахану находится в хорошем соответствии с теоретическими моделями развития сопутствующих разломов в зонах крупных сдвигов (Шерман и др., 1983), которые выделяются в самостоятельный класс «дуплексов сдвиговых зон» (Woodcock and Fisher, 1986). Это подтверждают опережающие разломы второго порядка, следящиеся параллельно основной плоскости сместителя Улахана, выраженные мини-сдвигами, которые в его зоне влияния как бы переходят из одного пласта в другой (Имаева и др., 2017). Морфологический облик таких закономерно перескакивающих разломов напоминает чуть сдвинутую колоду карт и уверенно указывает на левый тип смещения по ним (прил. 5.3).

Движения в очаге Улахан-Чистайского толчка, по данным параметров фокального механизма, приведенного в бюллетене ISC, произошли по типу левого сдвига, что также совпадает с левобокowymi перемещениями по разлому Улахан по геологическим данным (Имаев и др., 2000).

Другим известным тектоническим нарушением является разлом Дарпир, составляющий сопряженную динамопару с разломом Улахан. Он следится на расстоянии более 400 км и ограничивает Омулевское поднятие с юго-запада. Геологией Дарпира занимались многие исследователи (Мальков, 1971; Мерзляков, 1971; Гусев, 1979; Шахтыров, 1985; Имаев и др., 2000), которыми была установлена его взбросо-сдвиговая структура. Горные породы в зоне его разрыва подвержены интенсивной складчатости, сильному дроблению, рассланцеванию и милонитизации. На многих участках разлом следится по линейным магнитным аномалиям и резкой гравитационной ступени (Гусев, 1979). Амплитуда горизонтальных перемещений по нему сравнительно невелика и варьируется, по данным разных авторов, от 2–3 км (Шахтыров, 1985) до 8–10 км (Мерзляков, 1971; Гусев, 1979).

Оба дизъюнктива Улахан и Дарпир дешифрируются на средне- и крупномасштабных космо- и аэрофотоснимках. Они следятся на топокартах в виде прямых, протяженных линеаментов северо-западного простирания, которые сочленяются между собой под острым углом в 20–25°, ограничивая поднятый с амплитудой до 450–550 м Омулевский блок палеозойских пород, развитых среди мезозойских образований (рис. 5).

Согласно современным исследованиям, указанный блок является отдельным террейном, впаиваемым в «мезозойскую структурную раму» в процессе коллизионных и послеколлизионных преобразований структур Верхояно-Колымских мезозоид (Имаев и др., 2000; Парфенов и др., 2001). Мелкофокусная сейсмичность



Рис. 5. Структурно-динамическая модель области влияния разлома Улахан на юго-востоке сейсмогетонической зоны Черского (Имаева и др., 2017) с дополнениями:

1, 2 — активные разломы (1 — свдвиги, 2 — надвиги); 3 — эпицентр землетрясения; 4 — вулкан Балаган-Тас; 5 — фокальные механизмы землетрясений; дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черные точки) и растяжения (белые точки); 6 — сейсмодислокации. Во вставке представлена структурно-динамическая модель Омулевского блока. ОК — Охотоморская плита, НА — Североамериканская плита. Утолщенные стрелки показывают направление движения плит, тонкие — направление движения блоков

(глубина очагов местных землетрясений соответствует 5–20 км) почти равномерно заполняет весь объем блока. Это указывает на приповерхностную природу появления локальных землетрясений, что, возможно, связано с горизонтальными срывами, отделяющими этот рельеф от близлежащих структур, и подчеркивает его бескорневой характер (Парфенов и др., 2001; Fujita et al., 2009). Необходимо отметить, что сопряженная разрывная система Улахан — Дарпир представляет собой классическую динамопару, отражающую тип тектонических деформаций в юго-восточной части границы между Североамериканской и Охотоморской плитами. Во вставке (рис. 5) предлагается блок-схема образования Омудевского блока, подтверждающая экструзию (выталкивание) блока к юго-востоку при сближении указанных плит. Давление со стороны Североамериканской плиты способствует возникновению здесь условий транспрессии и активному развитию левобокowych перемещений вдоль трассы Улахана между реками Колыма и Индигирка. Фокальные механизмы сильных местных землетрясений (рис. 5) подтверждают сдвиговый характер перемещений тектонических блоков к юго-востоку и востоку. Именно эти признаки составляют основу структурно-динамической модели области влияния разлома Улахан на юго-востоке СЗЧ, объясняющей формирование крупных активных разрывных структур в виде левых сдвигов, сдвиго-взбросов и надвигов. При этом магистральным и основным сейсмогенерирующим разломом среди них является Улахан — главная структурная граница между Североамериканской, Евразийской и Охотоморской литосферными плитами на северо-востоке Азиатского континента.

5. Заключение

Исследования на юго-восточном фланге сеймотектонической зоны Черского, где произошло сильное Улахан-Чистайское землетрясение 2013 г., показали, что современная природа сейсмичности обусловлена здесь обстановкой горизонтального сжатия, которая способствовала развитию региональной системы сдвигов, взбросо-сдвигов и надвигов и интенсивной дислоцированности кайнозойских осадков. Эта характеристика геологической среды устанавливалась на основе изучения трещиноватости горных пород и зеркал скольжения в зонах активных разломов при изучении отложений кайнозойских впадин и прогибов, а также анализа многочисленных проявлений сейсмичности и параметров фокальных механизмов землетрясений (Имаев и др., 1990; 2000; Имаева и др., 2017).

На примере одного из главных разломов этой системы Улахан были рассмотрены присущие для него признаки геодинамической активности, характерные при современном тектоническом режиме сжатия. Прежде всего названный разлом формируется и развивается как левый сдвиг со скоростью движения до 0.7–0.8 см/год, что вызвало образование в пределах его левых кулис «эшелона» познекайнозойских мини-впадин pull-apart. Для разлома характерен высокий сейсмический потенциал с генерацией землетрясений с $M_s = 5.5–7$. Параметры фокальных механизмов сильных землетрясений с подвижками в очаге типа сдвига, взбросо-сдвига и надвига уверенно согласуются с кинематикой Улахана, определенной по геолого-структурным данным. Зона разлома сопровождается многочисленными сейсмопроявлениями (обвалы, оползни, камнепады и др.) и палеосейсмодислока-

циями. Для этой территории характерна повышенная плотность теплового потока (до 70 мВт/м²) и широкое развитие наледных процессов, как, например, Момская наледь (прил. 5.2) (Parfenov et al., 1988; Имаева и др., 2017). Пространственное совпадение этих явлений, по-видимому, неслучайно, так как все они тяготеют к зоне влияния разлома, современные подвижки по которому нарушают целостность строения земной коры и способствуют, вероятно, подтоку внутриземного тепла к поверхности, вызывая формирование таликов и появление наледей. Предложенная блок-диаграмма модели природы сеймотектонических движений в зоне динамического влияния разломов Улахан и Дарпир поддерживается произошедшим здесь сильным 8-балльным Улахан-Чистайским землетрясением 2013 г. и другими событиями, а также кинематикой активных разломов (рис. 5) и доказывает определяющую роль разлома Улахан в сейсмической жизни региона. Установленный кинематический план развития этой тектонической структуры, образующей центральную, стволую трассу и ее разветвления по краям, связан с тем, что сейсмогенерирующие структуры СЗЧ развиваются в условиях коллизии Евразийской (скорость движения 0.2 см/год) и Североамериканской (1 см/год) литосферных плит, движущихся навстречу друг другу (Steblov et al., 2003), что, несомненно, свидетельствует о высоком сейсмическом потенциале Улахана. Полученные результаты детальных сеймотектонических исследований могут являться основой анализа геодинамических режимов, а также сейсмогеодинамических построений для отдельных сегментов сейсмических поясов на Северо-Востоке России.

Литература

- Важенин, Б. П. (1992). Палеосейсмодислокации в сейсмическом поясе Черского. В: *Сейсмологические и петрофизические исследования на северо-востоке России*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 79–102.
- Гусев, Г. С. (1979). *Складчатые структуры и разломы Верхояно-Колымской системы мезозойд*. Москва: Наука.
- Имаев, В. С., Имаева, Л. П., Козьмин, Б. М. (1990). *Активные разломы и сеймотектоника Северо-Восточной Якутии*. Якутск: ЯИГН СО РАН.
- Имаев, В. С., Имаева, Л. П., Козьмин, Б. М. (2000). *Сеймотектоника Якутии*. Москва: ГЕОС.
- Имаев, В. С., Имаева, Л. П., Маккей, К. Д., Козьмин, Б. М. (2009). Геодинамика отдельных сегментов литосферных плит на северо-востоке Азии. *Геофизические исследования*, 10 (1), 5–17.
- Имаева, Л. П., Имаев, В. С., Козьмин, Б. М. (2011). Сеймотектонический анализ Яно-Индибирского сегмента зоны Черского. *Физика земли*, 12, 1–14.
- Имаева, Л. П., Имаев, В. С., Козьмин, Б. М., Мельникова, В. И., Середкина, А. И., Маккей, К. Д., Ашурков, С. В., Смекалин, О. П., Овсяченко, А. Н., Чипизубов, А. В., Сясько, А. А. (2017). *Сеймотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики*. Новосибирск: Изд-во СО РАН.
- Козьмин, Б. М. (1984). *Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений*. Москва: Наука.
- Козьмин, Б. М., Имаев, В. С., Имаева, Л. П. (2001). Сейсмичность и современная геодинамика. В: Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин, под ред., *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. Москва: МАИК/Интерпериодика, 33–67.
- Копп, М. Л. (1997). *Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе*. Москва: Научный мир.
- Красилов, С. А., Коломиец, М. В., Акимов, А. П. (2006). Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG. В: *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы*. Обнинск: ГС РАН, 77–83.

- Мальков, Б.И. (1971). Схема развития юго-восточной части Яно-Колымской геосинклинальной системы. В: *Мезозойский тектогенез. Материалы 7-й сессии Научного совета по тектонике Сибири и Дальнего Востока*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 53–57.
- Медведев, С.В., Шпонхойер, В., Карник, В. (1965). *Шкала сейсмической интенсивности MSK-64*. Москва: МГК АН СССР.
- Мерзляков, В.М. (1971). *Стратиграфия и тектоника Омуревского поднятия (северо-восток СССР)*. Москва: Наука.
- Николаев, П.Н. (1992). *Методика тектоно-динамического анализа*. Москва: Недра.
- Парфенов, Л.М., Оксман, В.С., Прокопьев, А.В., Тимофеев, В.Ф., Третьяков, Ф.Ф., Трунилина, В.А., Дейкуненко, А.В. (2001). Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области. В: Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин, под ред., *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. Москва: МАИК/Интерпериодика, 199–254.
- Шахтыров, В.Г. (1985). Разломные и сдвиговые морфоструктуры северо-востока СССР. В: *Морфо-структурные исследования. Теория и практика*. Москва: Наука, 190–194.
- Шерман, С.И., Борняков, С.А., Буддо, В.Ю. (1983). *Области динамического влияния разломов. Результаты моделирования*. Новосибирск: Наука.
- Шпикерман, В.И. (1998). *Домеловая минералогия северо-востока Азии*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН.
- Imaeva, L. P., Imaev, V. S. and Koz'min, B. M. (2016). Structural-dynamic model of the Chersky seismotectonic zone (continental part of the Arctic-Asian seismic belt). *Journal of Asian Earth Sciences*, 116, 59–68.
- www.isc.ac.uk. (2020). *Standard bulletin search*. [online] Доступно на: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> [Дата доступа 20.11.2020].
- Fujita, K., Koz'min, B. M., Mackey, K. G., Riegel, S. A., Mclean, M. S. and Imaev, V. S. (2009). Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia. В: *Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov*. Stephan Mueller Spec. Publ., 4, 117–145.
- Gsras.ru. (2020). *Geophysical Survey Russian Academy of Sciences (Federal Research Center)*. [online] Доступно на: <http://www.ceme.gsras.ru> [Дата доступа 20.11.2020].
- www.globalcmt.org. (2020). *Global Centroid Moment Tensor Project*. [online] Доступно на: <http://www.globalcmt.org> [Дата доступа 20.11.2020].
- Mackey, K. G., Fujita, K. and Ruff, L. J. (1998). Crustal thickness of northeast Russia. *Tectonophysics*, 284, 283–297.
- Mackey, K. G., Fujita, K., Hartse, H. E., Steck, L. K., Gunbina, L. V., Leyshuk, N., Shibaev, S. V., Koz'min, B. M., Imaev, V. S., Gordeev, E. I., Chebrov, V. N., Masal'ski, O. K., Gileva, N. A., Bormatov, V. A., Voitenok, A. A., Levin, Y. N. and Fokina, T. A. (2007). *Seismicity of Eastern Russia 1960–2007: map.2007*. LAUR-04-138.
- Nokleberg, W. J., West, T. D., Dawson, K. M., Shpikerman, V. I., Bundtzen, T. K., Parfenov, L. M., Monger, J. W. H. and Ratkin, V. V. (1998). *Summary terrane, mineral deposit, and metallogenic belt maps of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera*. US Geological Survey, Open-File Report, 98-136, CD.
- Parfenov, L. M., Koz'min, B. M., Grinenko, O. V., Imaev, V. S. and Imaeva, L. P. (1988). Geodynamics of the Chersky seismic belt. *Journal of Geodynamics*, 9, 15–37.
- Steblov, G. M., Kogan, M. G., King, R. W., Scholz, C. H., Burgmann, R. and Frolov, D. I. (2003). Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (18). <https://doi.org/10.1029/2001TC001333>
- Woodcock, N. and Fischer, M. (1986). Strike-slip duplexes. *Journal Struct. Geol.*, 8 (7), 725–735.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2019 г.
Статья рекомендована в печать 12 октября 2020 г.

Контактная информация:

Имаева Людмила Петровна — imaeva@crust.irk.ru

Козьмин Борис Михайлович — b.m.kozmin@diamond.ysn.ru

Strong Ulakhan-Chistay earthquake ($M_s=5.7$) January 20, 2013 in the zone of influence Ulakhan fault system in North East Russia*

V. S. Imaev^{1,2†}, L. P. Imaeva¹, B. M. Koz'min²

¹ Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128, ul. Lermontova, Irkutsk, 664033, Russian Federation

² Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39, pr. Lenina, Yakutsk, 677980, Russian Federation

For citation: Imaev, V. S., Imaeva, L. P., Koz'min, B. M. (2020). Strong Ulakhan-Chistay earthquake ($M_s=5.7$) January 20, 2013 in the zone of influence Ulakhan fault system in North East Russia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (4), 740–759. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.408> (In Russian)

In this paper we present the results of the interpretation of seismological, geologic-structural, seismotectonic and macroseismic data obtained for the focal zone of the strong Ulakhan-Chistay earthquake ($M_s=5.7$), which occurred on January 20, 2013, in the Chersky seismotectonic zone on the boundary of the Eurasian and North American lithospheric plates. The shock occurred in the zone of a large Ulakhan fault, which is visible in satellite images and can be seen in the topography between the Indigirka and Kolyma Rivers at a distance of 1,500 km. Statistics of seismic observations in the last century and at the beginning of this century show that more than 14,000 local events were noted in the zone of influence of the Ulakhan fault within the crust (~35 km thick) at a depth of 7–30 km. The epicentral intensity of more than ten of them reached 6–8 on the Russian scale (MSK-64). In addition to high seismicity, additional geodynamic indicators of the reactivation of the Ulakhan fault in modern times were identified — in particular, high heat flux, icing processes, paleo- and modern seismic dislocations, etc. The macro effects of this event were studied on an area of 300,000 square kilometers in three Arctic regions of Yakutia and in the south of the Magadan region; its epicenter is located by the proximity to the well-preserved paleoseismic dislocation Uryun-Takh-Takh, which arose more than a thousand years ago and is clearly visible in the search system of Google. As a result, a structural-dynamic model of the Ulakhan fault zone is proposed, explaining the occurrence of the Ulakhan-Chistay earthquake on the basis of the kinematic scheme of the Omulevsky block, which is undergoing extrusion by a collision between the Eurasian and North American lithospheric plates in Northeast Asia.

Keywords: seismicity, focal mechanisms of earthquakes, active faults, paleoseismic dislocations, lithospheric plates in Northeast Asia, extrusion of tectonic blocks.

References

- Fujita, K., Koz'min, B. M., Mackey, K. G., Riegel, S. A., Mclean, M. S. and Imaev, V. S. (2009). Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia. In: *Geology, geophysics and tectonics of Northeastern Russia: a tribute to Leonid Parfenov*. Stephan Mueller Spec. Publ., 4, 117–145.
- Gsras.ru. (2020). *Geophysical Survey Russian Academy of Sciences (Federal Research Center)*. [online] Available at: <http://www.ceme.gsras.ru> [Accessed 20 Nov. 2020].

* The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-05-00062, project IZK SB RAS (No. 346-2018-0001) and IGABM SB RAS (No. 0381-2019-0001), as well as the program of the Presidium of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) for a comprehensive study of its territory.

- www.globalcmt.org. (2020). *Global Centroid Moment Tensor Project*. [online] Available at: <http://www.globalcmt.org> [Accessed 20 Nov. 2020].
- Gusev, G. S. (1979). *Folded structures and faults of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoic system*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Imaev, V. S., Imaeva, L. P. and Kozmin, B. M. (2000). *Seismotectonics of Yakutia*. Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Imaev, V. S., Imaeva, L. P. and Kozmin, B. M. (1990). *Active faults and seismotectonics of North-Eastern Yakutia*. Yakutsk: YaIGN SB RAS Publ. (In Russian)
- Imaev, V. S., Imaeva, L. P., Mackey, K. D. and Kozmin, B. M. (2009). Geodynamics of individual segments of lithospheric plates in northeast Asia. *Geophysical Research*, 10 (1), 5–17. (In Russian)
- Imaeva, L. P., Imaev, V. S. and Kozmin, B. M. (2011). Seismotectonic analysis of the Yana-Indigirka segment of the Chersky zone. *Physics of the Earth*, 12, 1–14. (In Russian)
- Imaeva, L. P., Imaev, V. S. and Kozmin, B. M. (2016). Structural-dynamic model of the Chersky seismotectonic zone (continental part of the Arctic-Asian seismic belt). *Journal of Asian Earth Sciences*, 116, 59–68.
- Imaeva, L. P., Imaev, V. S., Kozmin, B. M., Melnikova, V. I., Seredkina, A. I., Mackey, K. D., Ashurkov, S. V., Smekalin, O. P., Ovsyuchenko, A. N., Chipizubov, A. V. and Syasko, A. A. (2017). In: *Seismotectonics of the northeastern sector of the Russian Arctic*. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS. (In Russian)
- www.isc.ac.uk. (2020). *Standard bulletin search*. [online] Available at: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> [Accessed 20 Nov. 2020].
- Kopp, M. L. (1997). *Structures of lateral squeezing in the Alpine-Himalayan collision belt*. Moscow: Nauchnyi mir Publ. (In Russian)
- Kozmin, B. M. (1984). *Seismic belts of Yakutia and mechanisms of sources of their earthquakes*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Kozmin, B. M., Imaev, V. S. and Imaeva, L. P. (2001). Seismicity and modern geodynamics. In: L. M. Parfenov, M. I. Kuzmin, ed., *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: MAIK/Interperiodica Publ., 33–67. (In Russian)
- Krasilov, S. A., Kolomiets, M. V. and Akimov, A. P. (2006). Organization of the digital seismic data processing process using the WSG software package. In: *Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the International Seismological School*. Obninsk: GS RAS Publ., 77–83. (In Russian)
- Mackey, K. G., Fujita, K., Hartse, H. E., Steck, L. K., Gunbina, L. V., Leyshuk, N., Shibaev, S. V., Kozmin, B. M., Imaev, V. S., Gordeev, E. I., Chebrov, V. N., Masal'ski, O. K., Gileva, N. A., Bormatov, V. A., Voitenok, A. A., Levin, Y. N. and Fokina, T. A. (2007). *Seismicity of Eastern Russia 1960–2007: map.2007*. LAUR-04-138.
- Mackey, K. G., Fujita, K. and Ruff, L. J. (1998). Crustal thickness of northeast Russia. *Tectonophysics*, 284, 283–297.
- Mal'kov, B. I. (1971). Development scheme of the southeastern part of the Yano-Kolyma geosynclinal system. In: *Mesozoic tectogenesis. Materials of the 7th session of the Scientific Council on tectonics of Siberia and the Far East*. Magadan: SVKNII FEB RAS Publ., 53–57. (In Russian)
- Medvedev, S. V., Sponhoyer, V. and Karnik, V. (1965). *Seismic intensity scale MSK-64*. Moscow: MGK AS USSR Publ. (In Russian)
- Merzlyakov, V. M. (1971). *Stratigraphy and tectonics of the Omulevka uplift (north-east of the USSR)*. Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Nikolaev, P. N. (1992). *Technique of tectonic-dynamic analysis*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Nokleberg, W. J., West, T. D., Dawson, K. M., Shpikerman, V. I., Bundtzen, T. K., Parfenov, L. M., Monger, J. W. H. and Ratkin, V. V. (1998). *Summary terrane, mineral deposit, and metallogenic belt maps of the Russian Far East, Alaska, and the Canadian Cordillera*. US Geological Survey, Open-File Report, 98-136, CD.
- Parfenov, L. M., Kozmin, B. M., Grinenko, O. V., Imaev, V. S. and Imaeva, L. P. (1988). Geodynamics of the Chersky seismic belt. *Journal of Geodynamics*, 9, 15–37.
- Parfenov, L. M., Oksman, V. S., Prokopiev, A. V., Timofeev, V. F., Tretyakov, F. F., Trunilina, V. A. and Deikunenko, A. V. (2001). Collage of terranes of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic area. In: L. M. Parfenov, M. I. Kuzmin, ed., *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: MAIK/Interperiodica Publ., 199–254. (In Russian)

- Shakhtyrov, V.G. (1985). Fault and strike-slip morphostructures in the north-east of the USSR. In: *Morpho-structural studies. Theory and practice*. Moscow: Nauka Publ., 190–194. (In Russian)
- Sherman, S. I., Bornyakov, S. A. and Buddho, V. Yu. (1983). *Areas of dynamic influence of faults. Simulation results*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Shpikerman, V.I. (1998). *Domestic minerageny of northeast Asia*. Magadan: SVKNII FEB RAS Publ. (In Russian)
- Steblov, G.M., Kogan, M.G., King, R.W., Scholz, C.H., Burgmann, R. and Frolov, D.I. (2003). Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (18). <https://doi.org/10.1029/2001TC001333>
- Vazhenin, B.P. (1992). Paleoseismic dislocations in the Chersky seismic belt. In: *Seismological and petro-physical studies in the north-east of Russia*. Magadan: SVKNII FEB RAS Publ., 79–102. (In Russian)
- Woodcock, N. and Fischer, M. (1986). Strike-slip duplexes. *Journal Struct. Geol.*, 8 (7), 725–735.

Received: March 14, 2019
Accepted: October 12, 2020

Contact information:

Lyudmila P. Imaeva — imaeva@crust.irk.ru
Boris M. Koz'min — b.m.kozmin@diamond.ysn.ru