

УДК 550.348. (571.56)

СЕЙСМИЧНОСТЬ ЯКУТИИ в 2018–2019 гг.

С.В. Шибаетов¹, W. Geissler², Б.М. Козьмин^{1,3}, Р.М. Туктаров¹,
А.А. Макаров^{1,3}, А.С. Куляндина¹

¹Якутский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Якутск, shibaev@emsd.ysn.ru

²Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера,
Бремерхафен, Германия, wolfram.geissler@awi.de

³Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
г. Якутск, kozmin@diamond.ysn.ru

Аннотация. По информации, полученной с 20 стационарных цифровых сейсмических станций ЯФ ФИЦ ЕГС РАН, был исполнен двухлетний (2018–2019 гг.) сейсмический мониторинг территории Республики Саха (Якутия). За данный временной интервал отмечено свыше 730 землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 7.2$ и магнитудой $M_p \geq 1.8$. В предыдущие два года их число было 801. Проявления сейсмичности маркировали пространственное положение контактных зон и составляющих их блоков известных литосферных плит, Евразийской и Северо-Американской в северо-восточных и арктических районах, а также Евразийской и Амурской – в южных районах Якутии. В совокупности эпицентрально-полосы трассировали отдельные линеаменты рельефа и выделяли активные пограничные структуры, объединенные в два масштабных сейсмических пояса: Байкало-Становой и Арктико-Азиатский. Их очертания выглядят как полосы эпицентров землетрясений, вытянутых на юге от р. Олёкма до Охотского моря и на северо-востоке и в Арктике как ансамбли отдельных групп и цепочек землетрясений между морями Лаптевых и Охотским. Значительная сейсмическая активность установлена в Олёкминском районе и Алданском нагорье (Южная Якутия), а также на Яно-Оймяконском нагорье, хребте Черского и в море Лаптевых – на северо-востоке региона. Построена карта эпицентров для всей территории республики и дан анализ сеймотектонической обстановки в 12 сейсмоактивных районах, выявленных с учетом их рельефа. Отдельно рассмотрена карта Арктических землетрясений в дельте р. Лена, составленная по данным обработки цифровых сейсмограмм с 25 полевых автономных станций, установленных в рамках российско-германского проекта «Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона» (СИОЛА). На этом участке в пределах земной коры в течение четырех лет (2016–2019 гг.) было зарегистрировано свыше 2 тыс. землетрясений небольших энергетических классов $K_p \geq 7.2$ – 10.7 ($M_p \geq 1.8$ – 3.7) в интервале глубин 1–36 км. Приводится характеристика наиболее сейсмоактивных локальных тектонических структур, развитых в этой местности.

Ключевые слова: эпицентры землетрясений, фокальные механизмы, активные разломы, сейсмические пояса Якутии, литосферные плиты, глубина очага, дельта р. Лена, хребет Черского.

Для цитирования: Шибаетов С.В., Geissler W., Козьмин Б.М., Туктаров Р.М., Макаров А.А., Куляндина А.С. Сейсмичность Якутии в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 200–209. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.16> EDN: NVOKJN

Введение. Основной целью настоящей работы является разбор результатов мониторинга сейсмичности территории Республики Саха (Якутия) в 2018–2019 гг., который выполнялся по наблюдениям сети из 20 цифровых станций. Так как проявления сейсмичности в регионе занимают огромную площадь, около 1.5 млн. км² [1], вся территория была поделена на 12 сейсмоактивных районов согласно их географическому и геолого-структурному положению (рис. 1) для надежной локализации землетрясений, установления реальных сеймотектонических связей и объективной оценки локальной сейсмичности. Кроме распределения эпицентров в пространстве, в статье обсуждаются сведения о макросейсмических эффектах и параметрах механизмов очагов наиболее значимых землетрясений.

Сеть стационарных станций. В сети сейсмических станций Якутии за рассматриваемый период, относительно 2017 г. [2], произошли некоторые изменения. После ремонта в июле 2018 г. возобновила свою работу станция «Депутатский» (DEPR). В августе из-за сокращения финансирования была закрыта станция «Артык» (ATKR). На пяти пунктах в северо-восточных районах: «Белая Гора» (YBGR), «Булус» (BLS), «Депутатский» (DEPR), «Мома» (MOMR) и «Усть-Нера» (UNR) была завершена смена устаревшего оборудования, а в Южной Якутии также реализованы частичная модернизация и ремонт приборов в пунктах регистрации «Алдан» (ALDR),

«Чагда» (CGD), «Олёкминск» (OLMR), «Чернышевский» (YCRN) и «Тын-да» (TNDR). Расположение сейсмических станций показано на рис. 1. На карте также обозначены эпицентры землетрясений, зарегистрированные в 2018–2019 гг., границы региона и 12 районов, а также системы активных разломов, господствующих на северо-востоке Азии [3].

Информация об аппаратном обеспечении сейсмических станций приведена в Приложении 1.

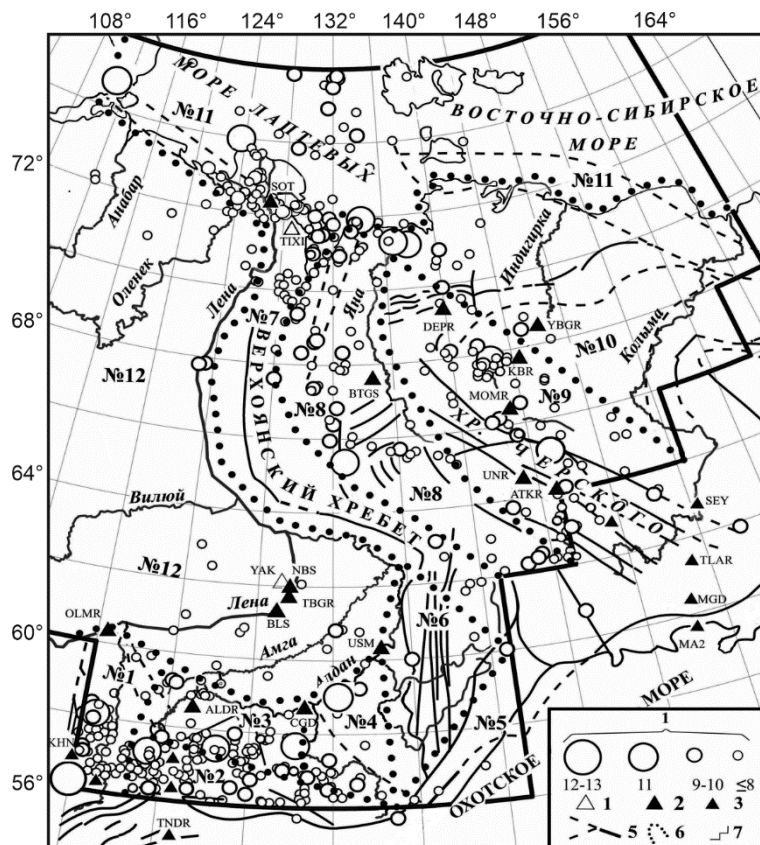


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Якутии с $K_p=7.2-12.3$ за 2018–2019 гг.

1 – энергетический класс землетрясения K_p ; 2, 3 – сейсмическая станция, опорная и региональная соответственно; 4 – сейсмическая станция соседних регионов; 5 – разлом [3], установленный (сплошная линия) и предполагаемый (пунктирная); 6, 7 – граница района и региона соответственно.

Кроме того, в 2018–2019 гг. были пролонгированы полевые локальные исследования землетрясений в арктических районах Якутии в рамках проекта «Seismicity and neotectonics of Laptev Sea region (SIOLA)» (Сейсмичность и неотектоника региона моря Лаптевых, СИОЛА). Они проводились ЯФ ФИЦ ЕГС РАН (г. Якутск) совместно с Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва) и Гельмгольцским центром полярных и морских исследований Полярного института им. А. Вегенера (Германия). Полевые станции в основном были сосредоточены на западном берегу губы Буор-Хая моря Лаптевых и в районе Быковской и Оленёкской протоков (дельта р. Лена). Их количество (25), в сравнении с таковым в 2016–2017 гг., оставалось неизменным, как и тип цифровой аппаратуры [2].

Методика обработки наблюдений и представительность регистрации землетрясений. Определение параметров эпицентров землетрясений внутри региона проводилось, в основном, по данным якутских станций, а на границе с соседними зонами привлекались материалы сетей наблюдений Байкальского, Сахалинского и Магаданского филиалов ФИЦ ЕГС РАН. При этом применялся типовой для Федерального центра программный комплекс WSG [4] с привлечением алгоритмов осредненного регионального годографа С.И. Голенецкого [5]. Оценка энергетического класса землетрясений K_p реализовалась по номограмме Т.Г. Раутиан [6] с пересчетом в магнитуды M^p по формуле $M^p=(K_p-4)/1.8$ [7].

Представительность регистрации землетрясений сохранялась на уровне таковой в 2017 г. [2]. В южных районах Якутии она соответствовала событиям с $K_p \geq 7$ для западной и с $K_p \geq 8-9$ –

для восточной частей этой территории. На северо-востоке республики от побережья моря Лаптевых до Северного Приохотья (граница с Магаданским филиалом ФИЦ ЕГС РАН) без пропусков фиксировались местные толчки с $K_p \geq 8$. В целом для всего региона полностью фиксировались землетрясения с $K_p \geq 11-12$. В дельте р. Лена сетью полевых и стационарных станций не пропускались сейсмические события, начиная с $K_p \geq 7$. Только на северо-западном фланге района Хребет Черского (№ 9) подземные толчки с $K_p \leq 8$ регистрировались с пропусками из-за закрытия станций. По этой же причине частично прерывалась регистрация в восточной части Сибирской платформы. В дельте р. Лена полевыми и стационарными наблюдениями целиком фиксировались толчки с $K_p \geq 7$.

Каталог землетрясений и карта эпицентров. В каталоге сейсмических событий Якутии (Прил. 2) приведены параметры 730 землетрясений с $K_p=7.2-12.3$ ($M^p=1.8-4.6$). Позднее эти сведения дополнялись информацией из Сейсмологического бюллетеня (сеть телесеизмических станций) [8] и Международного бюллетеня ISC [9]. Все очаги землетрясений произошли в пределах земной коры на глубинах до 30 км. В Приложении 3 даны сведения о параметрах механизмов очагов двух землетрясений, зарегистрированных 12 апреля 2018 г. с $K_p=12.2$ и 5 мая 2019 г. с $K_p=11.4$, рассмотренных ниже. Распределение числа подземных толчков в каталоге по районам и энергетическим классам показано в табл. 1.

Таблица 1. Распределение числа землетрясений по энергетическим классам K_p и суммарной сейсмической энергии ΣE по районам за 2018–2019 гг.

№	Район	K_p						N_{Σ}	ΣE , Дж
		7	8	9	10	11	12		
1	Олёкминский	36	51	13	4	2	2	108	$2.364 \cdot 10^{12}$
2	Становой хребет	34	42	12	2	1	–	91	$8.682 \cdot 10^{10}$
3	Алданское нагорье	35	50	10	1	2	–	98	$1.771 \cdot 10^{11}$
4	Учурский	5	13	4	–	–	–	22	$9.024 \cdot 10^9$
5	Охотский	–	3	1	–	–	–	4	$1.607 \cdot 10^9$
6	Хребет Сетге-Дабан	1	–	1	–	–	–	2	$5.328 \cdot 10^8$
7	Верхоянский хребет	14	25	4	2	–	–	45	$2.322 \cdot 10^{10}$
8	Яно-Оймяконское нагорье	16	25	15	1	3	–	60	$2.914 \cdot 10^{11}$
9	Хребет Черского	31	44	16	1	2	–	94	$4.367 \cdot 10^{11}$
10	Приморская низменность	3	6	3	–	–	–	12	$5.983 \cdot 10^9$
11	Лаптевский	50	72	21	8	3	1	155	$2.516 \cdot 10^{12}$
12	Восточная часть Сибирской платформы	16	18	4	1	–	–	39	$3.198 \cdot 10^{10}$
	Всего	241	349	104	20	13	3	730	$5.965 \cdot 10^{12}$

По данным каталога (Прил. 2) составлена карта эпицентров, которая приведена на рис. 1. Пространственное положение эпицентров землетрясений в 2018–2019 гг. совпадает с картиной их распределения в 2016–2017 гг. [2]. Все выявленные события сосредоточены в двух крупных сейсмических поясах, разграничивающих Евразийскую, Североамериканскую и Амурскую литосферные плиты в Северо-Восточной Азии: Арктико-Азиатском – на северо-востоке и Байкало-Становом – на юге территории [3].

Анализ разделения числа якутских землетрясений по 12 районам (табл. 1) свидетельствует, что, хотя в общих чертах сейсмическая обстановка между предыдущим (2016–2017 гг.) [2] и настоящим (2018–2019 гг.) периодами регистрации сохранилась (табл. 1), все же здесь имели место изменения в сумме событий N_{Σ} и выделенной при них сейсмической энергии ΣE . В частности, наибольшие колебания этих величин фиксировались в сейсмоактивных районах №№ 1, 3, 8, 9, 11, а в остальных районах эти параметры уменьшились или оставались без изменений. В целом уровень сейсмической энергии при местных землетрясениях в 2018–2019 гг. соответствовал $\Sigma E=5.96 \cdot 10^{12}$ Дж, что в 4 раза больше, чем $\Sigma E=1.50 \cdot 10^{12}$ Дж в 2016–2017 гг.

Анализ сейсмичности по районам. В Южной Якутии (районы 1–5), где выделяется Олёкмо-Становая сеймотектоническая зона (восточная часть Байкало-Станового пояса), наблюдалось уменьшение числа зафиксированных сотрясений с $K_p \geq 7.2$ ($M^p \geq 1.8$) с $N_{\Sigma}=536$ в 2016–2017 гг. до $N_{\Sigma}=323$ в 2018–2019 гг. при увеличении высвобожденной сейсмической энергии с $\Sigma E=10.88 \cdot 10^{11}$ Дж до $\Sigma E=26.39 \cdot 10^{11}$ Дж.

Олёкмо-Становая зона (ОСЗ) приурочена к зоне влияния крупного субширотного регионального Станового разлома, разделяющего Евразийскую и Амурскую литосферные плиты [3]. Она охватывает территорию между 56° – 58° Е и продолжает полосу очагов землетрясений от Байкальского рифта к Охотскому морю. Вновь максимум сейсмичности наблюдался на западе ОСЗ в районе **Олёкмо-Чарского нагорья (№ 1)** и в районе **Станового хребта (№ 2)**, где случились события с N_{Σ} , равные 108 и 91 соответственно, что почти в 1.5 раза меньше, чем в 2016–2017 гг., когда их число достигало 162 и 161 [2]. Самым активным в районе № 1 был участок Чаруодинского роя 2005 г. [10], где были зарегистрированы четыре заметных ($K_p \geq 11.4$) землетрясения, произошедшие: 4 апреля 2018 г. в $05^{\text{h}}07^{\text{m}}$ с $K_p=10.6$, $h=25$ км; 12 апреля 2018 г. в $06^{\text{h}}06^{\text{m}}$ с $K_p=12.2$, $h=8$ км; 9 декабря в $23^{\text{h}}40^{\text{m}}$ с $K_p=11.6$, $h=25$ км; 15 мая 2019 г. в $19^{\text{h}}31^{\text{m}}$ с $K_p=11.4$, $h=10$ км. Согласно Приложению 4, землетрясение 9 декабря 2018 г. ощущалось в населенном пункте Чара ($\Delta=155$ км) с интенсивностью $I_i=2-3$ балла, а также на железнодорожных станциях трассы БАМ «Хани» ($\Delta=74$ км) с $I_i=3$ балла и «Новая Чара» ($\Delta=162$ км) – 2–3 балла по шкале MSK-64 [11].

Пространственное расположение роевых землетрясений за рассматриваемый период, показанное на рис. 2, тождественно их проявлениям в 2015 г. [12]. Они сосредоточены в верховьях р. Олдонгсо (левый приток р. Олёкма) и приурочены к системе пересекающихся разрывных нарушений субдолготного и близширотного простираний. Здесь также была отмечена пульсация как в выделении сейсмической энергии ΣE (ее максимумы приходятся на IV квартал 2018 г. – землетрясение 9 декабря и II квартал 2019 г. – толчок 15 мая), так и в сокращении числа N_{Σ} таких минисотрясений, свидетельствующие о затухании роевого процесса.

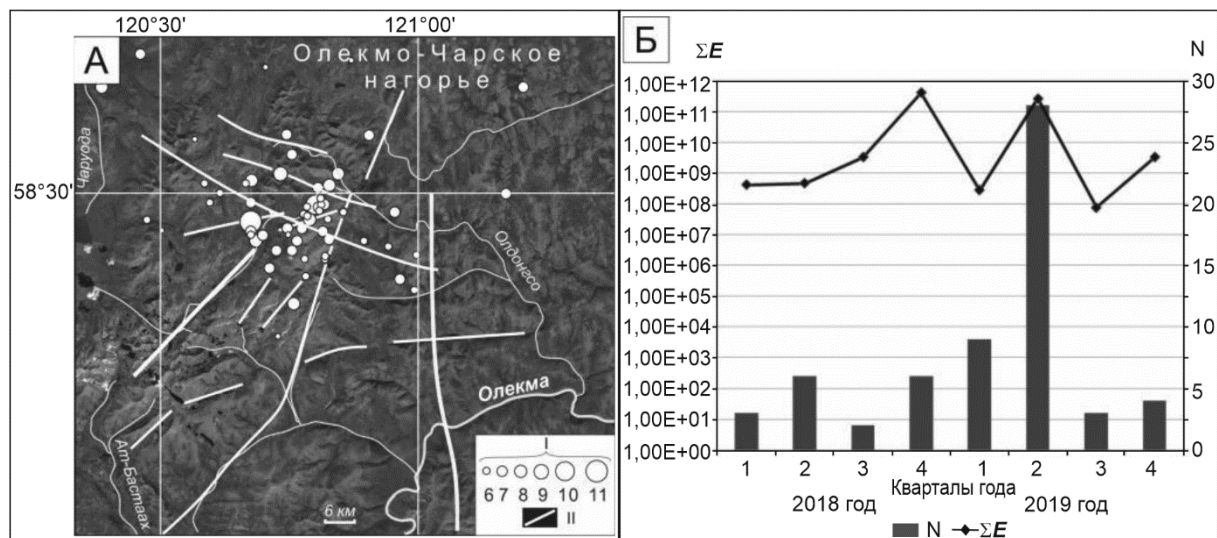


Рис. 2. Локализация событий Чаруодинского роя (А) и график изменения по кварталам суммарной сейсмической энергии ΣE и чисел N роевых землетрясений в 2018–2019 гг. (Б)

Для двух событий, произошедших 12 апреля 2018 г. с $K_p=12.2$ и 15 мая 2019 г. с $K_p=11.4$, в бюллетене ISC [9] имеются решения их фокальных механизмов (табл. 2), полученные агентствами GCMT и ИЕС (Приложение 3), подтверждающих сбросовую подвижку в их очагах (рис. 3). Таким образом, для данного района вновь подтверждается господство режима тектонических напряжений растяжения Байкальского типа [3].

Таблица 2. Механизмы очагов землетрясений Южной Якутии в 2018–2019 гг. по решениям мировых сейсмологических центров ИЕС и GCMT

Агент-ство	Дата, дн мес год	t_0 , ч мин с	h , км	M_w [9]	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
					T		N		P		NP1			NP2		
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
ИЕС	12.04.2018	06 06 14.1	5	4.6	28	325	6	86	61	188	66	18	-111	268	73	-83
GCMT	15.05.2019	19 31 44.3	18	4.7	5	356	22	264	68	98	108	44	-58	247	54	-117

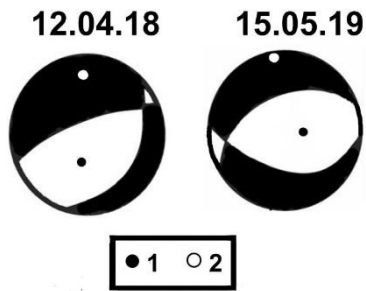


Рис. 3. Диаграммы механизмов очагов Южно-Якутских землетрясений в проекции нижней полусферы

1, 2 – оси главных напряжений сжатия и растяжения соответственно, зачернена область волн сжатия.

На северо-востоке республики в 2018–2019 гг. сформировалось разрозненное «облако» в виде отдельных цепочек и групп эпицентров землетрясений, располагающихся по краям и внутри континентальной части Арктико-Азиатского сейсмического пояса. К ним относятся сейсмические воздействия, отмеченные в районах *Верхоянский хребет* (№ 7) и *Яно-Оймяконское нагорье* (№ 8), которые составили как бы единую обращенную к западу «дугу» из 105 толчков с $K_p=7.2-10.0$ в районе № 7 и с $K_p=7.2-11.0$ в районе № 8. Однако наибольшая плотность эпицентров, которые заполнили практически всю территорию, характерна для района № 8. Здесь выделяются два кластера: первый – в дельте р. Яна с двумя близкими ($\varphi_1=71.28^\circ\text{N}$, $\lambda_1=136.73^\circ\text{E}$ и $\varphi_2=71.18^\circ\text{N}$, $\lambda_2=137.79^\circ\text{E}$) и интенсивными ($K_p=10.7$ и 11.0) толчками, отмеченными 9 июня 2018 г. в $20^{\text{h}}54^{\text{m}}$ на глубине $h=10$ км и 4 августа 2019 г. в $13^{\text{h}}22^{\text{m}}$ на глубине $h=21$ км, второй – в среднем течении р. Яна (точнее в бассейне ее правого притока Адыча), также с крупным ($K_p=11.0$) землетрясением 19 марта 2019 г. в $04^{\text{h}}21^{\text{m}}$ на глубине $h=9$ км.

Отдельная группа из 11 толчков просматривается в центре района *Хребет Черского* (№ 9) и относится к афтершокам 9-балльного Илин-Тасского (Абыйского) землетрясения 2013 г. [13] с крупным ($K_p=11.5$) событием, возникшим 5 апреля 2018 г. в $17^{\text{h}}26^{\text{m}}$ на глубине $h=5$ км. Появление данной группы связывается с современными подвижками по разломам Индигино-Колымской системы Верхояно-Чукотской складчатой области [3]. Другое равного объема скопление сейсмопроявлений с $N_\Sigma=11$, самое сильное из которых отмечено 27 января 2019 г. в $01^{\text{h}}41^{\text{m}}$ с $K_p=11.0$ на глубине $h=20$ км, расположилось в зоне влияния известного разлома Улахан этой же Индигино-Колымской системы разрывов, где в 2013 г. наблюдалось 8-балльное Улахан-Чистайское событие [14].

Следует также отметить малочисленные слабые толчки на юго-восточной окраине хребта Черского в районе *Приморская низменность* (№ 10) с $N_\Sigma=12$ и на западных склонах Верхоянского хребта в районе *Восточная часть Сибирской платформы* (№ 12) с $N_\Sigma=39$ (табл. 1).

В *Лаптевском районе* (№ 11), в акватории и на побережье моря Лаптевых, более активны были участки в Янском заливе, губе Буор-Хая и устье р. Лена, где в общей сложности произошло свыше 150 слабых землетрясений. Более интенсивными среди них были три моретрясения: севернее дельты р. Лена, вблизи о. Дунай, 20 июля 2018 г. в $18^{\text{h}}29^{\text{m}}$ с $K_p=10.7$, $h=18$ км; в Янском заливе 8 августа 2018 г. в $03^{\text{h}}06^{\text{m}}$ с $K_p=11.5$ и $h=25$ км, – а также эпицентр Таймырского события, расположенный особняком вблизи о. Большой Бегичев и зафиксированный 19 декабря 2019 г. в $11^{\text{h}}22^{\text{m}}$ с $K_p=10.6$, $h=30$ км.

Исследования арктических землетрясений в дельте р. Лена (Российско-Германский проект «СИОЛА»). Регистрация подземных толчков в Арктике в 2018–2019 гг., как и в предыдущие 2 года [2], проводилась системой из 25 полевых цифровых пунктов наблюдений, установленных вдоль Оленёкской и Быковской протоков дельты р. Лена, а также на западном берегу губы Буор-Хая и о. Муостах. Сейсмические события также записывались стационарными станциями «Тикси», «Столб» и временными пунктами на полигоне вблизи пос. Тикси (рис. 4). Это

Легко заметить, что восточнее, на правобережье р. Олёкма, количество произошедших местных землетрясений сопоставимо с таковыми на Олёкмо-Чарском нагорье, достигая в системе Станового хребта $N_\Sigma=91$, а в районе *Алданское нагорье* (№ 3) – $N_\Sigma=98$ подземных толчков, что меньше, чем в 2016–2017 гг. [2]. Большинство их гипоцентров располагалось по всей толще земной коры на глубинах 3–30 км. Следует выделить здесь три умеренных ($K_p \geq 11$) землетрясения. Два из них – 11 июня 2018 г. в $01^{\text{h}}40^{\text{m}}$ $K_p=10.7$ и 10 июля 2018 г. в $08^{\text{h}}21^{\text{m}}$ с $K_p=11.0$ (оба – на глубине 10 км) – были локализованы на Алданском нагорье, третье зарегистрировано 4 декабря 2018 г. в $05^{\text{h}}46^{\text{m}}$ с $K_p=10.7$ на глубине 26 км в Становом хребте.

В *Учурском районе* (№ 4), на востоке ОСЗ, было определено всего 22 подземных удара, тяготеющих к хр. Лурикан. Слабые сейсмические возмущения имели место в *Охотском районе* (№ 5) с $N_\Sigma=4$, так же, как и в районе *Хребет Сетте-Дабан* (№ 6), где число сейсмических явлений наименьшее – $N_\Sigma=2$ (табл. 1). Их энергетический класс K_p не превышал 9.0 (Приложение 2).

позволило без пропусков фиксировать здесь события с $K_p \geq 7$, хотя эта сеть также регистрировала и более слабые толчки, с $K_p = 3-6$, но с пропусками (табл. 3).

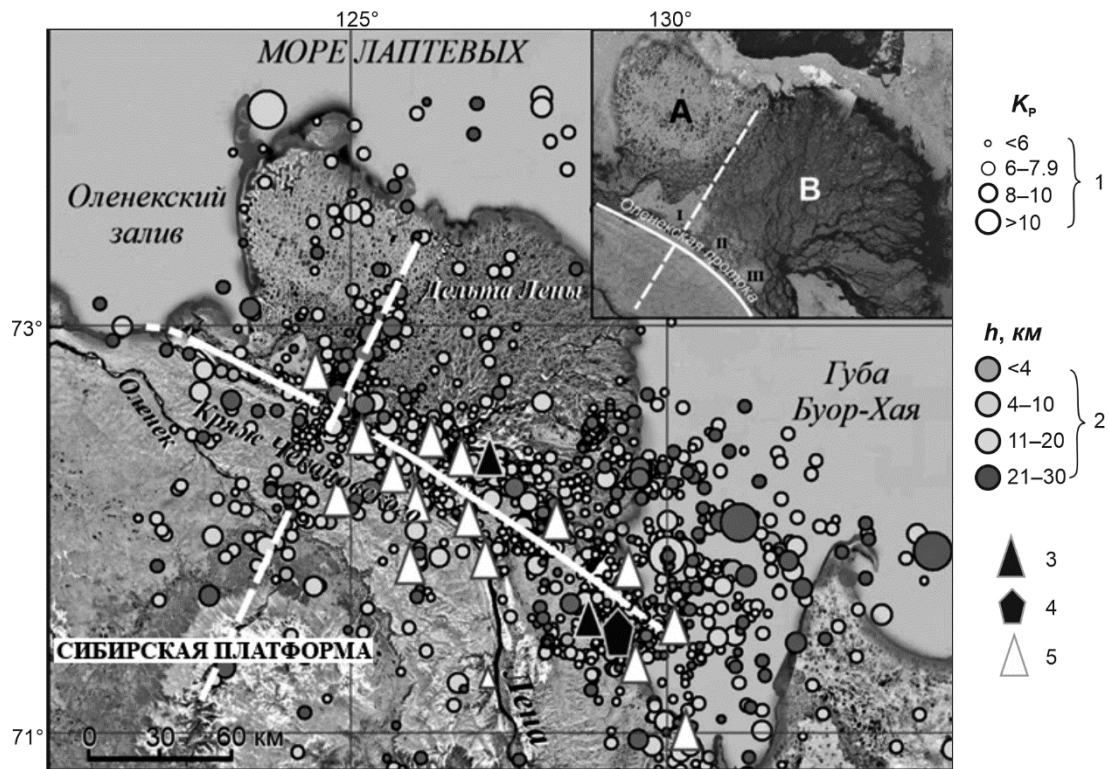


Рис. 4. Карта эпицентров Арктических землетрясений в низовьях р. Лена по наблюдениям сети полевых цифровых сейсмических станций (СИОЛА) в 2016–2019 гг.

1 – энергетический класс K_p ; 2 – глубина очага h , км; 3 – стационарная сейсмическая станция; 4 – полигон из нескольких сближенных временных станций рядом с «Тикси»; 5 – полевой пункт наблюдений. Сплошной линией показана трасса Дюлонгского регионального разлома (взбросо-сдвиг) NW-простираения; штриховой линией обозначен Муора-Сиский поперечный региональный разлом NE-направления [3].

На врезке: фрагмент геоморфологического дешифрирования космоснимка дельты р. Лена с выделением линейментов I–III ее рельефа (острова в дельте, примыкающие к зоне влияния Дюлонгского разлома): I – о. Хартанг-Сисё; II – о. Дангылах-Сисё; III – о. Курунгнах-Сисё. А – область тектонического поднятия (о. Арга-Муора-Сисё), В – область тектонического погружения [15].

Анализ проявлений сейсмичности, зарегистрированной в 2016–2017 гг. [2], показал, что местные сейсмические события группировались в основном в двух кластерах – Оленёкском, вытянутом в северо-западном направлении вдоль Быковской и Оленёкской протоки, и Буорхайнском, следящимся с юга на север вблизи западного берега и в центральной части губы Буор-Хая моря Лаптевых. После пополнения названной карты землетрясений данными за 2018–2019 гг. была получена обновленная картина (рис. 4) распределения эпицентров Арктических землетрясений дельты р. Лена за 4 года (2016–2019 гг.). Это позволило дать более полное представление о размещении подземных толчков в дельте и примыкающей к ней континентальной части суши. Всего за названный период здесь было выявлено более 2 тыс. местных подземных толчков (табл. 3).

Таблица 3. Распределение числа Арктических землетрясений по энергетическим классам K_p за 2016–2019 гг. в дельте р. Лена

Энергетический класс K_p	Число событий N_{Σ} (%)
<5.9	1263 (56 %)
6–7.9	866 (38 %)
8–9.9	141 (6 %)
10–11.5	5 (0.003 %)
Всего	2273

В итоге на карте рис. 4 можно визуально выделить три сейсмоактивных кластера: Буор-Хаинский, Оленёкско-Быковский и Муора-Сиский.

Буор-Хаинская полоса землетрясений от Хараулахского хребта в Северном Верхоянье тянется к северу в район Усть-Ленского грабена на шельфе моря Лаптевых [16]. Эта полоса, как и раньше, тяготеет к Приморскому сбросу вдоль западного побережья Буор-Хаинской впадины и сети сбросов на ее дне [3], которые генерируют большей частью местные слабые ($K_p=4-10$) и глубокофокусные ($h=21-36$ км) события. Сравнительно сильный толчок с $K_p=10.5$ был зафиксирован здесь 2 декабря 2019 г. в 07^h49^m на глубине 26 км (Прил. 2) в северной части впадины. После этого в течение 1.5 часов в пределах 20 км от данного события произошло еще пять толчков на глубинах 26–30 км с $K_p=6.8-8.3$.

Оленёкско-Быковская зона эпицентров повторяет конфигурацию облака эпицентров за 2016–2017 гг., которое укладывается в зону влияния Дюлюнгского взбросо-сдвига. При этом более активно северное крыло этого разлома, где сейсмичность аккумулируется вдоль и вокруг цепочки островов Хартанг-Сисё (I), Дангылах-Сисё (II) и Курунгнах-Сисё (III), расположенных на правом берегу Оленёкской протоки (вставка на рис. 4). Для данной зоны характерно частое возникновение слабых ($K_p=4-8$) землетрясений, занимающих верхнюю часть ($h=4-10$ км) земной коры, мощность которой достигает здесь ~ 30 км [17].

Третий Муора-Сиский кластер представляет полосу эпицентров, которая наблюдается в среднем течении долины р. Оленёк (Сибирская платформа [3]), пересекает кряж Чекановского, Оленёкскую протоку, о. Харданг-Сисё и продолжается на северо-восток вплоть до северного побережья дельты р. Лены. Эта эпицентральная полоса имеет длину более 200 км при ширине 25–40 км. В пределах кластера выделяются три фрагмента: северный, от северного побережья дельты до о. Хартанг-Сисё (большинство толчков – глубокофокусные, с очагами в нижней части земной коры ($h=21-30$ км) вблизи раздела кора–мантия); центральный (крупный разломно-тектонический узел с преобладанием слабой ($K_p=6-7$) приповерхностной сейсмичности в верхней части земной коры) и южный (участок Сибирской платформы с событиями в средней части коры с энергетическим классом $K_p=6-10$ и $h=4-10$ км). Рассматриваемый кластер контролируется предполагаемым Муора-Сиским разломом, названным по месту расположения рядом с ним о. Арга-Муора-Сисе. Линия этого тектонического разрыва показана на фрагменте космоснимка (врезка на рис. 4) по фототону изображения и разделяет дельту на две части: западную – светлая (А) и восточную – темная (В). На снимке отчетливо видны низменные наиболее водонасыщенные участки территории, которые поглощают при съемке часть светового излучения в ближней зоне и потому изображаются темным цветом (зона «В»). Высокоподнятый рельеф с сухими участками показан светлым цветом, где отсутствует спектральное поглощение. Рис. 4 подтверждает, что зона «А» приподнята, а зона «В» опущена [15].

Используя данные результатов геоморфологических исследований с помощью геодезического профилирования, проведенных Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ) [18], можно предположить, что возникновение Муора-Сиского дизъюнктива связано с расколом земной коры между западной и восточной частями дельты под влиянием положительных неотектонических движений. При этом скорость поднятия зоны «А» (~ 2 мм/год) в два раза превышает таковую для зоны «В» (~ 1 мм/год). Под их воздействием западная часть дельты, наиболее старая по возрасту (возможно, плейстоцен), испытывает тектоническое поднятие, тогда как восточная часть, более молодая (голоцен), отстает в росте от вышеназванной и подвергается тектоническому погружению, что вызвало перекося земной и водной поверхности и смену течения реки с северо-западного направления (более древний сток) в устье Оленёкской протоки р. Лена на восточное (юго-восточное) к современному устью Быковской протоки. При этом участок данного перекося приходится на линию Муор-Сиского разлома.

Таким образом, район дельты р. Лена следует отнести к активно развивающемуся сложному структурному объекту с формами рельефа, возникшими в результате максимального прогибания земной поверхности, как следствие неравномерных тектонических движений. Переформирование стока в протоках дельты и изменение очертаний русловой сети происходит непосредственно в современную эпоху [18], и этот процесс сопровождается сейсмическими явлениями.

Заключение. В течение последних четырех лет (2016–2019 гг.) сетью из 20 постоянных и 25 полевых цифровых станций в Якутии на территории в 1.5 млн. км² было зарегистрировано

свыше 3000 близких землетрясений с $K_p=5.9-12.3$. В их числе около 730 с $K_p \geq 7.2$ относятся к периоду 2018–2019 гг., что соответствует нормальному сейсмическому фону. Очаги землетрясений располагались в уже известных зонах взаимодействия крупных литосферных Евразийской, Североамериканской и Амурской тектонических плит. В их границах развиваются два крупных сеймотектонических пояса: Арктико-Азиатский на северо-востоке и в Арктике, а также Олёкмо-Становая зона (восточный фланг Байкало-Станового пояса) – на юге. Стабильно наблюдается реактивация сеймотектонического процесса в местах долгоживущих роевых последовательностей (Чаруода, 2005 г., юг региона) [10] и афтершоковых серий (Илин-Тас, 2013 г., хр. Черского, северо-восток) [13], а также в крупном кластере слабых подземных толчков в дельте р. Лена с выделением регионального Муора-Сисского разлома, вдоль которого отмечается максимальное прогибание земной коры, влияющее на трансформацию границ дельты и изменение основного стока р. Лены вдоль Оленёкской протоки с запада на восток. Обращает на себя внимание небольшой уровень высвобожденной сейсмической энергии в дельте р. Лена, несмотря на множество (более 2 тыс.) слабых сотрясений (табл. 3), на 90 % составивших объем «сейсмического» баланса за истекший период наблюдений. Это, скорее всего, можно объяснить низким пока темпом современных тектонических движений, но имеющих тенденцию к их росту.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания № 75-01271-23 с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

В подготовке электронных приложений к данной статье принимали участие: С.В. Шибает, Б.М. Козьмин, Д.М. Пересыпкин, Н.Н. Старкова, Е.В. Хастаева, Т.П. Москаленко, Е.Г. Денег, А.С. Куляндина, Н.А. Лукаш.

Электронное приложение App13_Yakutia_2018–2019 (<http://www.gsras.ru/zse/app-26.html>): 1 – Сейсмические станции, работавшие в Якутии в 2018–2019 гг.; 2 – Каталог землетрясений Якутии с $K_p \geq 7.2$ за 2018, 2019 гг.; 3 – Каталог механизмов очагов землетрясений Якутии за 2018–2019 гг.; 4 – Макросейсмический эффект ощутимых землетрясений в населенных пунктах Якутии за 2018–2019 гг.

Л и т е р а т у р а

1. Козьмин Б.М., Имаев В.С., Имаева Л.П. Сейсмичность и современная геодинамика // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). – М: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – С. 33–67.
2. Шибает С.В., Geissler W., Козьмин Б.М., Туктаров Р.М., Макаров А.А. Сейсмичность Якутии в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.) – С. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.16>. EDN: XTGLLR
3. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сеймотектоника Якутии. – М.: ГЕОС, 2000. – 226 с.
4. Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Первой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77–83.
5. Голенецкий С.И. Землетрясения Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР в 1985 году. – М.: Наука, 1988. – С. 124–135.
6. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.
7. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности (Труды ИФЗ АН СССР; № 9 (176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
8. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2019. (2022). // ФИЦ ЕГС РАН [сайт]. – URL: http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2019/
9. International Seismological Centre. (2023). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
10. Шибает С.В., Петров А.Ф., Козьмин Б.М., Имаева Л.П., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Тимиршин К.В., Петрова В.Е., Гилёва Н.А., Пересыпкин Д.М. Чаруодинский рой землетрясений 2005 года и его ощутимые землетрясения: Чаруодинское-I 10 ноября в $19^{\text{h}}29^{\text{m}}$ с $K_p=15.7$, $M_w=5.8$, $I_0=8$ и Чаруодинское-II 11 декабря в $15^{\text{h}}54^{\text{m}}$ с $K_p=14.8$, $M_w=5.7$, $I_0=7$ (Южная Якутия) // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 404–418.

11. Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Международная шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
12. Шибаев С.В., Козьмин Б.М., Макаров А.А. Сейсмичность Якутии в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 173–181. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.16>
13. Шибаев С.В., Козьмин Б.М., Имаева Л.П., Имаев В.С., Петров А.Ф., Старкова Н.Н. Илин-Тасское (Абыйское) землетрясение 14 февраля 2013 г. с $M_w=6.7$ (Северо-Восток Якутии) // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 92–102. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.09>
14. Козьмин Б.М., Шибаев С.В., Имаева Л.П., Имаев В.С., Петров А.Ф. Улахан-Чистайское землетрясение 20 января 2013 г. с $K_p=14.4$, $M_w=5.6$, $I_0=8$ (Северо-восток Якутии) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 320–328. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2019.22.29>
15. Кандрюкова Н.А. Геоморфологическая и линеаментная структура дельты реки Лены по материалам дистанционной съемки // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2014. – № 1. – С. 169–176.
16. Туктаров Р.М., Шибаев С.В., Козьмин Б.М., Куляндина А.С., Гейслер В., Плетц А., Хаберланд К., Крюгер Ф., Баранов Б.В., Цуканов Н.В., Крылов А.А. Современная сейсмичность Арктического побережья Якутии // Труды 8-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Петропавловск-Камчатский, 2021. – С. 112–116. (Электронный ресурс). DOI: <https://doi.org/10.35540/903258-451.2021.8.20>.
17. Mackey K.G., Fujita K., Ruff L.J. Crustal thickness of northeast Russia // Tectonophysics. – 1998. – V. 284. – P. 283–297.
18. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. – Спб.: ААНИИ, 2013. – 268 с.

SEISMICITY of YAKUTIA in 2018–2019

S.V. Shibaev¹, W. Geissler², B.M. Koz'min^{1,3}, R.M. Tuktarov¹, A.A. Makarov^{1,3}, A.S. Kulyandina¹

¹*Yakutia Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russia, shibaev@emsd.ysn.ru*

²*The Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research,
Bremerhaven, Germany, wolfram.geissler@awi.de*

³*Institute of Diamond and Precious Metal Geology, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russia, kozmin@diamond.ysn.ru*

Abstract. According to the information received from 20 stationary digital seismic stations of the Yakutia Branch of Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, two-year (2018–2019) seismic monitoring of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) was carried out. During this time interval, more than 730 earthquakes with an energy class of $K_R \geq 7.2$ (magnitude $M \geq 1.8$) were registered. During the previous two years, their number was 801. Manifestations of seismicity fixed the spatial position of the contact zones and their constituent blocks of known lithospheric plates: the Eurasian and North American plates in the northeastern and arctic regions, as well as the Eurasian and Amur plates – in the southern areas of Yakutia. The epicentral fields traced individual relief lineaments and identified active boundary structures combined into two large-scale seismic belts – Baikal-Stanovoy and Arctic-Asian. Their outlines are seen as bands of earthquake epicenters, elongated from the Olekma River to the Sea of Okhotsk in the south and as ensembles of separate groups and chains of earthquakes between the Laptev and Okhotsk Seas in the northeast and in the Arctic. Significant seismic activity has been detected in the northeast of the region – in the Olekminsk region and the Aldan Highlands (South Yakutia), as well as in the Yano-Oymyakon Highlands, the Chersky Ridge and the Laptev Sea. A map of epicenters was constructed for the entire territory of the region, where 12 districts were identified and an analysis of the seismotectonic situation in each of them was given. The map of Arctic earthquakes in the Lena River delta is considered separately. It is compiled according to the processing of digital seismograms obtained at 25 autonomous field stations installed in accordance with the Russian-German project "Seismicity and Neotectonics of the Laptev Sea Region" (SIOLA). In this area during 2016–2019 more than 2 thousand shocks of small energy classes $K_R \geq 7.2-10.7$ ($M \geq 1.8-3.7$) were recorded within the depth interval of 1–36 km of the Earth's crust. The characteristics of the most seismically active local tectonic structures developed in this region are given.

Key words: earthquake epicenters, focal mechanism, active fault, seismic belt of Yakutia, lithospheric plate, source depth, delta of the Lena River, Chersky Ridge.

For citation: Shibaev, S.V., Geissler, W., Koz'min, B.M., Tuktarov, R.M., Makarov, A.A., & Kulyandina, A.S. (2023). [Seismicity of Yakutia in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 200–209. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.16> EDN: NVOKJN

References

1. Koz'min, B.M., Imaev, V.S., & Imaeva, L.P. (2001). *Sejsmichnost' i sovremennaya geodinamika* [Seismicity and modern geodynamics]. Moscow, Russia: MAIK "Nauka/Interperiodika" Publ., 33–67. (In Russ.).
2. Shibaev, S.V., Geissler, W., Koz'min, B.M., Tuktarov, R.M., & Makarov, A.A. (2022). [Seismicity of Yakutia in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 187–195. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.16>. EDN: XTGLLR
3. Imaev, V.S., Imaeva, L.P., & Koz'min, B.M. (2000). *Seismotektonika Yakutii* [Seismotectonics of Yakutia]. Moscow, Russia: GEOS Publ., 226 p. (In Russ.).
4. Krasilov, S.A., Kolomiets, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of Digital Seismic Data Processing Using a Software Package WSG]. In *Materialy I Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the I International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 77–83). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
5. Goleneckij, S.I. (1988). [Earthquakes of Baikal and Transbaikalia]. In *Zemletriaseniia v SSSR v 1985 godu* [Earthquakes in the USSR in 1985] (pp. 124–135). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
6. Rautian, T.G. (1964). [On the determination of the energy of earthquakes at a distance of 3000 km]. In *Ekspperimental'naiia seismika. Trudy IFZ AN SSSR № 32(199)* [Experimental seismic] (pp. 88–93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
7. Rautian, T.G. (1960). [Energy of the Earthquakes]. In *Metody detal'nogo izucheniya sejsmichnosti. Trudy IFZ AN SSSR, № 9(176)* [Methods of Detailed Study of the Seismicity] (pp. 75–114). Moscow, Russia: Inst. Fiz. Zemli Akad. Nauk SSSR Publ. (In Russ.).
8. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations, 2019. (2023). Retrieved from http://www.gsras.ru/ftp/Teleseismic_bulletin/2019
9. International Seismological Centre. (2023). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
10. Shibaev, S.V., Petrov, A.F., Koz'min, B.M., Imaeva, L.P., Mel'nikova, V.I., Radziminovich, N.A., Timirshin, K.V., Petrova, V.E., Gileva, N.A., & Peresyppkin, D.M. (2011). [The Charuoda swarm of earthquakes and its perceptible earthquakes: Charuoda-I of November 10 with $K_R=15.7$, $M_w=5.8$, $I_0=8$ and Charuoda-II of December 11 with $K_R=14.8$, $M_w=5.7$, $I_0=7$ earthquakes (South Yakutia)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2005 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2005] (pp. 404–418). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
11. Medvedev, S.V., Shponhoyer, V., & Karnik, V. (1965). *Mezhdunarodnaya shkala seysmicheskoy intensivnosti MSK-64* [MSK-64 International seismic intensity scale]. Moscow, Russia: MGK Academy of Sciences USSR Publ., 11 p. (In Russ.).
12. Shibaev, S.V., Koz'min, B.M., & Makarov, A.A. (2021). [Seismicity of Yakutia in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 173–181. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.16>
13. Shibaev, S.V., Kozmin, B.M., Imaeva, L.P., Imaev, V.S., Petrov, A.F., & Starkova, N.N. (2020). [The February 14, 2013 Ilin-Tas (Abyi) earthquake with $M_w=6.7$ (Northeast Yakutia)]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 92–102. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.09>
14. Kozmin, B.M., Shibaev, S.V., Isaeva, L.P., Isaev, V.S., & Petrov, A.F. (2019). [The January 20, 2013 Ulakhan–Chistai earthquake of $K_R=14.4$, $M_w=5.6$, $I_0^p=8$ (northeast Yakutia)]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), 320–328. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2019.22.29>
15. Kandriukova, N.A. (2014). [Geomorphological and lineament structure of the Lena River delta based on remote survey materials]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle* [Bulletin of St. Petersburg State University], 1, 69–176. (In Russ.).
16. Tuktarov, R.M., Shibaev, S.V., Koz'min, B.M., Kulyandina, A.S., Geisler, V., Plets, A., Haberland, K., Kruger, F., Baranov, B.V., Tsukanov, N.V., & Krylov, A.A. (2021). [Modern seismicity of the Arctic coast of Yakutia]. In *Trudy 8 Vserossijskoj nauchno–tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the 8th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation] (pp. 112–116). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/903258-451.2021.8.20>
17. Mackey, K.G., Fujita, K., & Ruff, L.J. (1998). Crustal thickness of Northeast Russia. *Tectonophysics*, 284, 283–297.
18. Bol'shiyanov, D.Yu., Makarov, A.S., Schneider, V., & Shtof, G. (2013). *Proiskhozhdenie i razvitie del'ty reki Leny* [Origin and development of the Lena River delta]. Saint Petersburg, Russia: AANI Publ., 268 p. (In Russ.).