

УДК 551.435.64 (235.223)

КОНУСЫ ВЫНОСА В ДОЛИНЕ Р. ЖОМ-БОЛОК (ВОСТОЧНЫЙ САЯН): СТРОЕНИЕ, ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ ВОДОТОКА

© 2021 г. Е. В. Лебедева^{1,*}, Д. В. Мишурицкий^{1,2,**}, В. А. Пеллинен^{3,***},
Т. М. Сковитина^{3,****}, Д. В. Михалёв^{2,*****}

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет Москва, Россия

³ Институт земной коры СО РАН Иркутск, Россия

*E-mail: ekaterina.lebedeva@gmail.com

**E-mail: mishurinsk@mail.ru

***E-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

****E-mail: skovit@crust.irk.ru

*****E-mail: mikhalev.dmitry@gmail.com

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

После доработки 25.11.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Днище троговой долины р. Жом-Болок около 13 тыс. л. н. на всем протяжении (около 70 км) было перекрыто потоками базальтовых лав. В настоящее время на лавовый поток опираются обширные конусы выноса притоков реки, сложенные преимущественно селевым материалом. Всего отмечено 80 таких конусов общим объемом около 210 млн м³; наиболее крупные из них расположены на участках среднего и нижнего течения, где они занимают от 15 до 25% площади днища долины. Скорость денудации в бассейнах левобережных притоков р. Жом-Болок за 13 тыс. л. составила почти 24 мм/тыс. л. Очевидно, что это лишь среднеминимальная скорость, так как в некоторых случаях конусы выноса более крупных водотоков частично размыты рекой. В настоящее время активность селевых процессов невелика, о чем свидетельствует задернованность и залесенность рассматриваемых конусов; по данным исследований на сопредельной территории, пик селеформирования пришелся на начало голоцена. Наряду с излиянием лав, вынос значительных объемов рыхлого материала притоками оказал влияние на морфологию и развитие долины р. Жом-Болок. В постэруптивный период сток изначально шел по внутрилавовым туннелям, частично он сохранился и сейчас. Рост конусов вызывал заполнение рыхлым материалом лавовых пустот, что препятствовало подлавовому стоку, способствовало формированию озер в днище долины и смещению русла реки. Общий врез реки в лавовый поток за постэруптивный этап достиг 6–7 м. В паводки в долине активно формируется эрозионная пойма, в том числе и за счет размыва дистальных частей конусов выноса. Судя по результатам петрографического и минералогического анализов руслового аллювия р. Жом-Болок, в нем в настоящее время абсолютно доминирует материал, вынесенный притоками: содержание обломков базальтов, как правило, не превышает 10%.

Ключевые слова: лавовый поток, русло, конус выноса, сель, подпрудное озеро, денудация, Бурятия, Восточная Сибирь

DOI: 10.31857/S0435428121020061

ВВЕДЕНИЕ

Позднекайнозойский вулканизм широко распространен на территории Центральной Азии: его источники имеют различную геодинамическую природу и приурочены к границам литосферных плит либо к их внутренним частям, но так или иначе они связаны с системами разломов [1–5 и др.]. Вулканический рельеф представлен преимущественно лавовыми плато и шлаковыми

конусами, а также долинными лавовыми потоками (лавовыми реками). Они распространены на Витимском плато, в Удоканской и Южно-Хангайской вулканических областях, в Восточно-Тувинском вулканическом ареале, в бассейнах рек Джиды, Оки, Енисея и др. [1, 3, 6, 7 и др.]. В Южно-Байкальской вулканической области разновозрастные кайнозойские излияния базальтов часто приурочены к молодым разломным зонам, по ко-

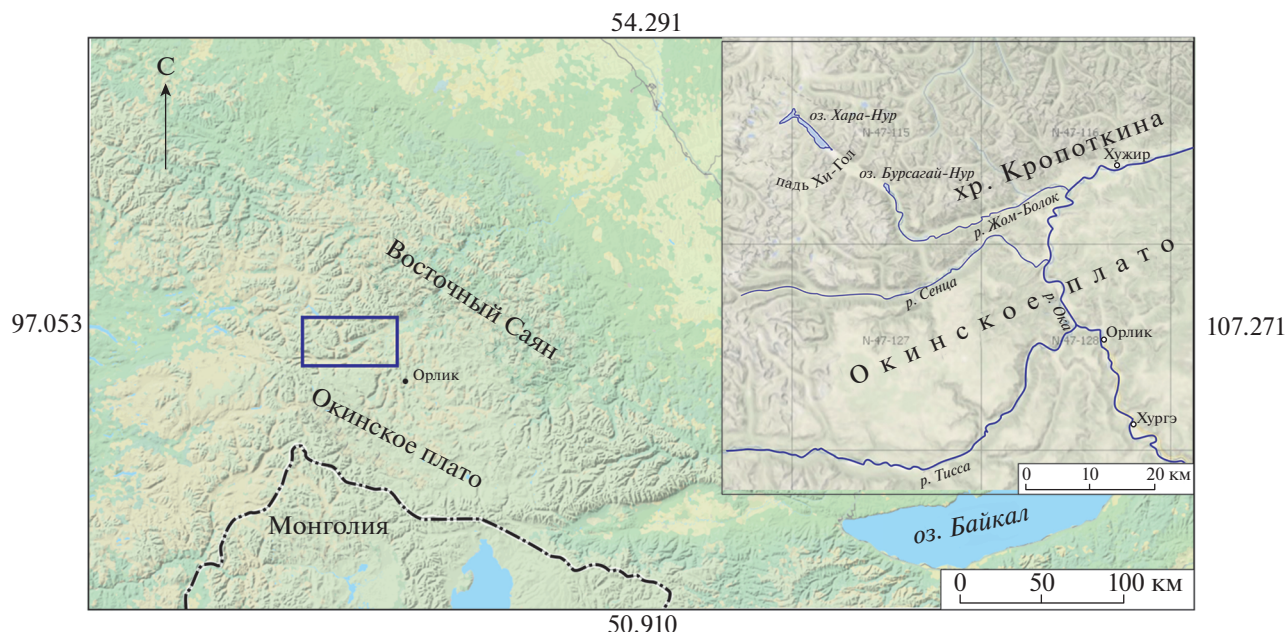


Рис. 1. Положение района исследований.

торым заложены и многие речные долины, и нередко центры излияния базальтов находятся непосредственно в этих эрозионно-тектонических формах.

Долинные лавовые потоки, как правило, имеют значительную протяженность (десяtkи километров); они вызывают изменения характера речного стока, морфологии и продольного профиля долин, в некоторых случаях — перестройки речной сети [8, 9]. Под влиянием флювиальной деятельности происходит постепенная трансформация и самих потоков лав. Все эти вопросы актуальны для Байкальской рифтовой зоны, где имеется несколько районов с долинами, заполненными лавами различных возрастных генераций. Однако развитие подобных долин изучено весьма слабо, детальных геоморфологических исследований в этом направлении практически не проводилось, за исключением бассейна р. Джиды [7]. Целью наших исследований является анализ геоморфологических процессов на протяжении постэруптивного этапа в одной из подобных долин, заполненных лавой, — долине р. Жом-Болок. В частности, важно понять, как формировались современное русло реки и ее аллювий.

Долина р. Жом-Болок¹ находится в Восточном Саяне на границе Окинское плоскогорья (плато) и хр. Кропоткина (рис. 1) и является левым притоком р. Оки в ее среднем течении. Она издавна привлекала внимание исследователей во многом

благодаря тому, что ее днище в конце позднего плейстоцена — голоцене было заполнено базальтовыми лавами. Лавы эти на настоящий момент весьма детально изучены геологами, получены результаты датирования органического материала, содержащегося как в продуктах извержения (в верхнем течении), так и в подстилающих и перекрывающих их отложениях в нижней части потока [4, 10, 11].

Проведенное нами опробование русловых отложений р. Жом-Болок показало, что, несмотря на то, что современное русло реки сформировано непосредственно в лавах, обломки базальтов в ее аллювии составляют лишь небольшую часть, а доминирует материал, сносимый с окружающих водораздельных пространств. Одной из характерных черт морфологии днища рассматриваемой долины являются обширные конусы выноса верного типа в устьях ее притоков, которые в значительной мере перекрывают молодое лавовое поле. Аналогичные образования наблюдаются и в долине соседнего притока р. Оки — р. Сенцы, однако уникальность ситуации в долине р. Жом-Болок состоит в том, что отложения конусов выноса залегают на базальтах и хорошо дешифрируются на их фоне, что позволяет достаточно точно идентифицировать их границы и определить площадь и объем. Таким образом мы можем оценить количество материала, вынесенного притоками в днище основной реки. Так как возраст лавового потока в долине определен с доступной на настоящий момент точностью, а значит известно время начала формирования конусов, то это позволяет

¹ В литературе и на топографических картах встречается два варианта написания названия реки — через дефис и без.

понять и темпы денудации в бассейнах притоков, откуда выносились эти отложения, что является второй, по сути сопутствующей, но не менее интересной задачей данной работы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных задач авторами проведен анализ литературного материала, дешифрирование спутниковых снимков на территорию бассейна р. Жом-Болок и маршрутные исследования в нижнем течении реки. На основе дешифрирования космических снимков спутника Sentinel-2 [12], полученных в 2018 г., в бассейне р. Жом-Болок нами было выделено 106 конусов выноса (КВ), из них 80 опираются непосредственно на лавовый поток в основной долине. На карте среднего и нижнего участков долины (рис. 2) показано 48 таких форм, для которых были выполнены расчеты.

Для определения границ и параметров конусов выноса с использованием программы ArcGIS были выбраны снимки конца августа, что позволило максимально уменьшить влияние древесной растительности. Границы конусов выноса выделялись по изменению морфологии поверхности, рисунку гидрологической сети и характеру фототона, отражающего распределение травянистой растительности, приуроченной к отложениям тонкого механического состава в дистальной части конусов. Впоследствии производился расчет площадей конусов выноса в заданных границах.

Объемы конусов вычислялись в программе MS Excel при помощи формулы объема сегмента конуса (1):

$$V_{\text{сегмента}} = \frac{\alpha^\circ}{360^\circ} * \frac{1}{3} * \pi R^2 H, \quad (1)$$

где α — угол вычисляемой части конуса (по сути привершинный угол), H — высота конуса, взятая из ЦМР (SRTM с пространственным разрешением 30 м (1 угловая секунда)), πR^2 — площадь основания сегмента (для простоты вычислений она принималась равной площади конуса, полученной при дешифрировании).

Весь массив конусов выноса был разделен на пять классов (табл. 1) с учетом наибольших разностей между величинами объемов.

Помимо этого, была выполнена наземная съемка с описанием строения двух крупных конусов в долине р. Жом-Болок (рис. 3). Измерение конуса 1 (№ 56 на рис. 2) выполнено с помощью лазерной рулетки-дальномера DISTOTM D510 фирмы "Leica" [13]. При проведении работ в приборе выбиралась функция "Измерение профиля", которая выводит на дисплей расстояние и превышение относительно указанной исходной нулевой точки, к которой привязывался весь про-

филь конуса. Параметры конуса 2 (№ 57 на рис. 2) были замерены и рассчитаны с помощью GPS-навигатора GARMIN (GPSMAP 64), которым снимались показания высоты и координаты основания конуса и его привершинной части.

Измеренные на местности площади конусов выноса оказались заниженными по сравнению с дешифрированными в среднем на 20–30%, что, видимо, было обусловлено сложностью определения их границ в полевых условиях по всей протяженности, хотя делались загогульки в их дистальных частях. В то же время при дешифрировании отбивка по фототону травянистой растительности на фоне темных базальтов осуществлялась достаточно легко, за исключением участков, частично подвергшихся переработке флювиальными процессами. Наиболее проблематичным было определение границы конуса и поймы реки на участках, покрытых травянистой растительностью.

Кроме того, было проведено опробование руслового аллювия, осадков конусов выноса и ледниковых отложений для определения их гранулометрического состава, петрографии галечного материала, минералогии песчаной фракции. Образцы аллювия отбирались на косах, подсчет галечного материала осуществлялся по стандартной методике на площадке 1 м²; пролювиальные и ледниковые отложения изучались в расчистках и шурфах. Опробование аллювия проводилось на протяжении 24 км нижнего течения реки через 3–4 км, как выше, так и ниже впадения притоков.

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ

Исследуемая территория находится в восточной части Восточного Саяна, в зоне сочленения Окинского плоскогорья и хр. Кропоткина [14]. Поднятие Восточно-Саянского горного массива имело сводово-глыбовый характер, сопровождалось обновлением древних разломов, возникновением межгорных впадин и излиянием базальтовых лав. Первая фаза кайнозойского горообразования началась здесь в олигоцене, вторая — в конце плиоцена, она продолжалась в течение всего четвертичного периода [15]. Хребет Кропоткина относится к наиболее активным неотектоническим структурам региона; от Окинского плоскогорья его отделяет Окинская котловина — узкий асимметричный грабен, ограниченный сбросами. Котловина находится на продолжении Байкальской рифтовой зоны, однако возможность ее отнесения к впадинам байкальского типа поддерживается не всеми исследователями [16]. Западное окончание Окинской впадины — приразломная долина-грабен (по терминологии Г.Ф. Уфимцева) нижнего течения р. Жом-Болок

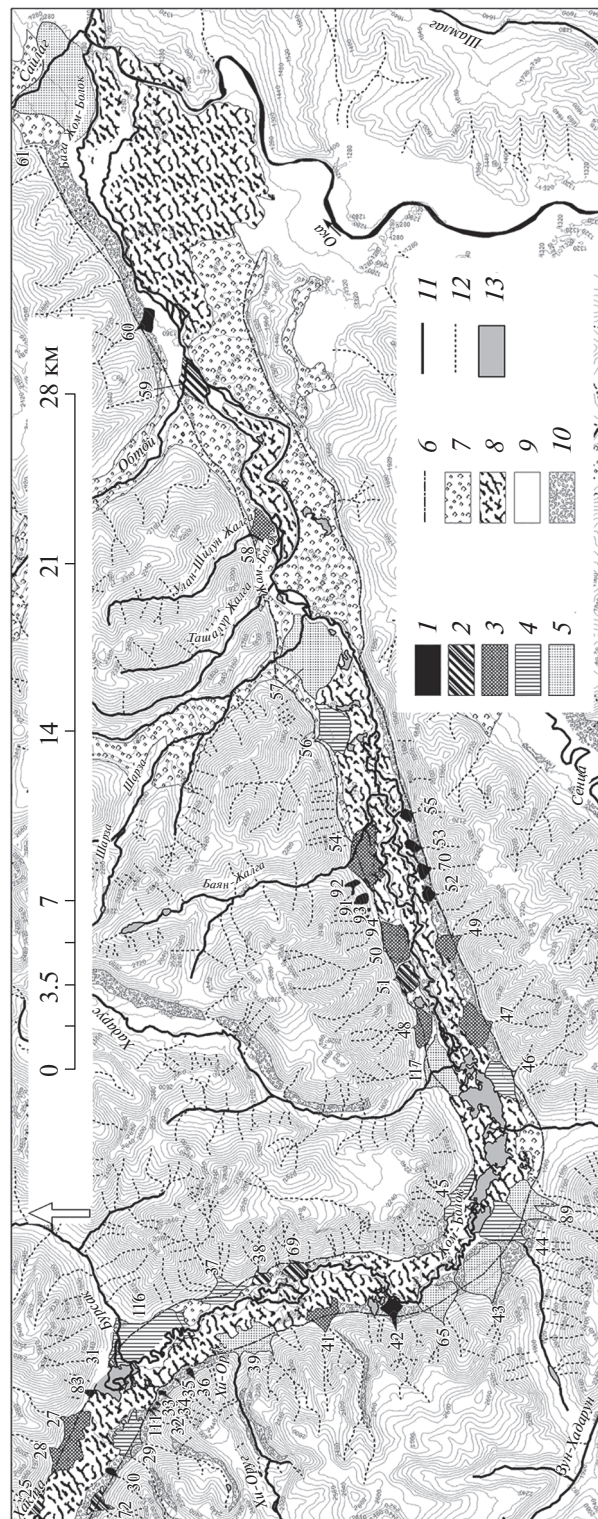


Рис. 2. Карта распространения конусов выноса в среднем и нижнем течении р. Жом-Болок.

1–5 – классы конусов выноса (см. табл. 1); 6 – граница днища долины; 7 – базальтовые лавы; 8 – ледниковые отложения; 9 – нерасчлененный комплекс поверхностных аллювиального генезиса (пойма, низкая терраса, террасовал); 10 – нерасчлененный комплекс склоновых и ледниковых отложений; 11 – реки; 12 – временные водотоки; 13 – озера.

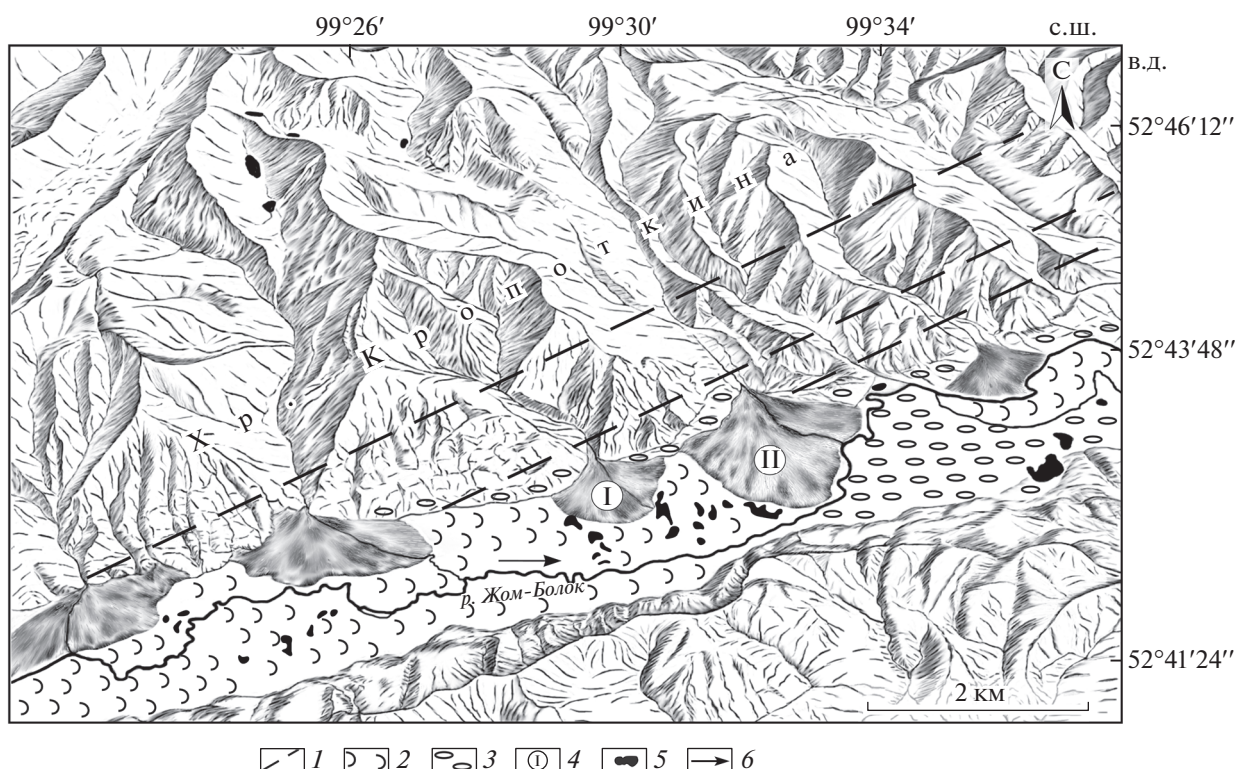


Рис. 3. Фрагмент долины р. Жом-Болок в ее нижнем течении.

1 – зона Окино-Жомболокского разлома; 2 – базальтовые лавы; 3 – позднеплейстоценовые ледниковые отложения; 4 – номера конусов выноса (I – № 56, II – № 57), промеры и анализ морфологии которых были проведены в полевых условиях 2018–2019 гг.; 5 – озера; 6 – направление течения р. Жом-Болок.

[14]. Разрывные нарушения обусловили и плановые очертания долины реки, на что указывают, в том числе, ее неоднократные повороты под прямым углом. Нижний участок долины, ориентированный ЗЮЗ-ВСС, совпадает с активным Окино-Жомболокским разломом (рис. 3), который ограничивает Окинскую впадину с севера; западнее разлом прослеживается в верховьях долины р. Сенцы. Для него характерны сдвиговая и сбросо-сдвиговая составляющие, а потенциальная сейсмичность оценивается в 7–8 баллов [17]. К разлому приурочено большинство эпицентров современных и палеоземлетрясений региона магнитудой 4.1–5 [18, 19].

Таблица 1. Объемы конусов выноса в долине р. Жом-Болок

Классы	Объем, млн. м ³	Количество конусов
1	<1	66
2	1–2.5	14
3	2.5–5.0	12
4	5.0–7.5	8
5	7.5–20.0	6

Долина р. Жом-Болок (водоток 5-го порядка) имеет глубину 700–800 м относительно водораздельных поверхностей, абс. отметки которых достигают 1800–2400 м над у. м. и более. Сложены междуречья преимущественно протерозойскими метаморфическими породами и прорывающими их палеозойскими гранитоидами. Соответственно, среди обломочного материала, выносимого притоками, преобладают продукты разрушения метаморфических и магматических пород, составляющих борта долины. Они представлены обломками гранитов (иногда с признаками бластомилонитизации), диоритов, гранодиоритов и габбро-диоритов, а также кварцитов, мраморов и др. Вдоль бортов долины отчетливо прослеживаются смещения по разлому и зоны повышенной трещиноватости, к которым приурочено активное развитие современных гравитационных процессов.

На формирование рельефа территории значительное влияние оказало оледенение, о чем свидетельствуют широко развитые экзарационные и аккумулятивные ледниковые формы. Сама долина-грабен р. Жом-Болок подверглась обработке ледником и сейчас морфологически представляет собой трог (рис. 4); в верховьях ее притоков наблюдаются многочисленные кары и цирки, ино-



Рис. 4. Вид вверх по долине р. Жом-Болок в ее нижнем течении (снимок с БПЛА В. Пеллинен, 2019 г.). Цифрами обозначены конусы выноса у левого борта долины близ пос. Шарза: I — конус № 56, II — конус № 57.

гда с озерами. Обширные конечные и боковые морены дешифрируются здесь практически во всех речных долинах, а также на перевальных седловинах междуречья рек Сенца и Жом-Болок.

Ледниковые отложения представлены галечно-валунным материалом пестрого петрографического состава, обычно средней, иногда хорошей окатанности. Позднеплейстоценовое оледенение имело здесь горно-долинный характер, мощность ледников по оценкам исследователей [20, 21] была не менее 300–400 м. Конечные морены, возраст которых по данным датирования бериллиевым методом (^{10}Be) [21, 22] составляет 22–23 тыс. л. н., сохранились в долине р. Жом-Болок на отметках 1300–1400 м. Деградация оледенения началась около 16 тыс. л. н. [21]. Судя по анализу кернов донных отложений оз. Каскадное-1 [23], примерно 14.3 тыс. л. н. долина р. Жом-Болок и ее притоки уже были свободны ото льда до отметок около 2080 м над у. м.

В долине р. Сенцы (также водоток 5-го порядка) — левого притока Оки, впадающего выше р. Жом-Болок, хорошо сохранились серии последовательных конечноморенных валов общей протяженностью вдоль долины до 10 км. Выше них по течению (примерно в 18–20 км от устья) днище долины занимают отложения подпрудного палеозера, сформировавшегося после деградации оледенения; вдоль бортов долины прослеживаются гряды боковых морен. Близкое строение имела бы и долина р. Жом-Болок, но около 13 тыс. л. н. (13.5–12.9 тыс. л. н. по [11] и 14.3–13.3 по [24]) в результате трещинного излияния в верховьях долины (падь Хи-Гол) ее днище на всем протяжении было перекрыто базальтовыми лавами. Длина потока составила около 70 км при ширине 2–4 км и мощности до 150 м [10] или даже 200 м [24]. Повторная активизация вулканиче-

ской деятельности также наблюдалась около 7–5.5 тыс. л. н. [4, 25], последняя — в интервале 1.3–0.8 тыс. л. н. Однако более молодые излияния были менее мощными и их отложения распространены локально — небольшими пятнами среди более старых лав [10, 11]. В нижнем течении р. Жом-Болок лавы местами обрамлены фрагментами боковых морен, частично перекрытых коллювием, а примерно в 21–23 км от устья реки лавовый поток резко сужается, “прорываясь” через конечноморенные валы жомболокского ледника (см. рис. 2). Ниже (в 7–10 км от устья) он опять расплывается, перекрывая флювиогляциальный конус выноса [11], сформировавшийся в приустьевой части реки при деградации ледника и, возможно, при прорыве аналогичного сенцинскому подпрудного палеозера.

Современный климат исследуемой территории резко континентальный, восточносибирского типа, для которого характерны значительные колебания суточных и годовых температур. Среднегодовая температура (метеостанция Орлик, абс. высота 1373 м) составляет -3.1°C . Годовое количество осадков невелико — 400–500 мм, причем 85–90% их выпадает в теплое время года; максимум приходится на июль. Район относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с температурами от -3°C до -5°C и мощностью от 100 до 400 м [26]. В базальтовых лавах мерзлотные процессы не идут, однако в долине р. Сенцы в тонкодисперсных озерных отложениях сформировались бугры пучения и термокарстовые озера² [27]. Питание рек территории

² В сентябре 2020 г. при бурении скважины в днище долины р. Сенца у пос. Шас-Нур (при непосредственном участии В.А. Пеллинен) на глубине 43 м были вскрыты под- или межмерзлотные (?) воды.

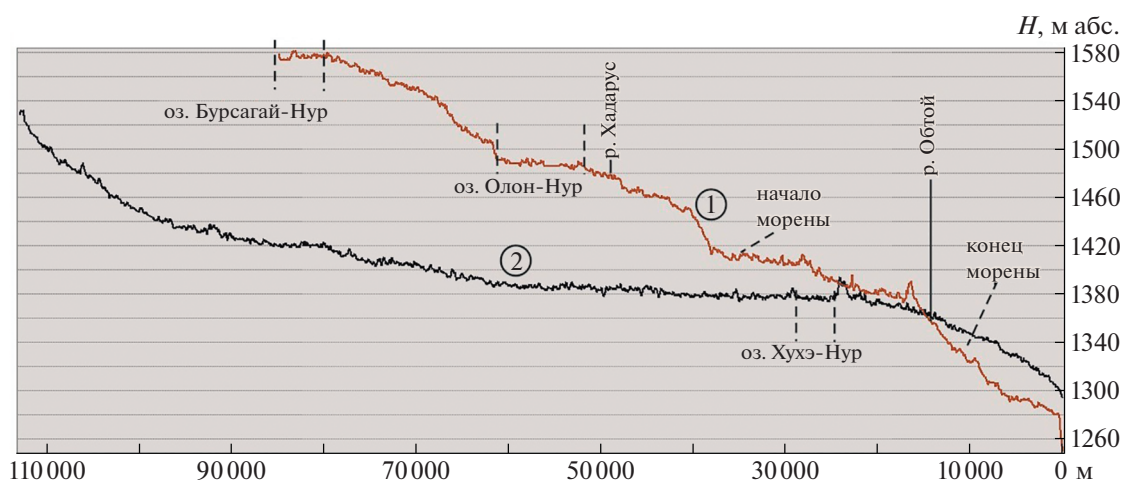


Рис. 5. Сравнение продольных профилей рек Жом-Болок (1) и Сенца (2).

осуществляется за счет атмосферных осадков, снеговых талых и подземных вод. Режим рек характеризуется весенне-летним половодьем; на многих из них существует возможность схода селевых потоков [28, 29]. Согласно исследованиям [30, 31], массовый сход селей на территории Восточного Саяна приходится на июль-август, его, как правило, вызывают затяжные дожди, завершающиеся ливнями. Накопление в долинах обломочного материала, достаточного для схода селя, занимает в среднем до 4–5 лет, однако крупные события происходят реже – раз в 15–23 года или даже в 30 лет [там же].

СТРОЕНИЕ ДНИЩА ДОЛИНЫ р. ЖОМ-БОЛОК

Базальтовые лавы, заполнившие днище троговой долины р. Жом-Болок около 13 тыс. л. н., имеют слабоволнистую поверхность со следами торошения. На таких участках рельеф лавового потока можно охарактеризовать в целом как “бугристо-западинный” с перепадами высот до 3–4 м, принимая во внимание то, что хаотично расположенные возвышенные участки представляют собой нагромождения базальтовых глыб. Примечательно и внутреннее строение лав, для которого характерно наличие большого количества протяженных пустот – лавовых туннелей, активно использующихся текущими водами. В верховьях долины современное русло реки не сформировано: сток идет под и внутри лавы по этим туннелям; поверхностный сток появляется только в среднем течении реки – ниже оз. Бурсагай-Нур. Скорость течения реки повсеместно превышает 1 м/с, в приустьевой части по данным [32] возрастающая до 1.3–1.5 м/с.

Современное русло сформировалось в результате постепенного разрушения бортов и кровли лавовых туннелей потоками воды, причем сначала происходило образование цепочек проточных (русловых) озер (их мы и сейчас видим на отдельных участках реки), а только затем хорошо выраженного руслового лотка с порогами в местах выхода более прочных сливных лав. Местами русло реки разветвляется на рукава, которые соединяются пересыхающими в межень протоками с озерами, расположенными на формирующейся в паводки эрозионной пойме, на отдельных участках перекрытой тонким супесчаным материалом с включением гравия пород преимущественно гранитного состава. Высота поймы составляет 1–3 м над современным урезом реки. Меженный уровень воды в реке на 3–5 м ниже уровня лавового потока, общая глубина вреза в лавы достигает 6–7 м. Современный продольный профиль реки невыработанный, ступенчатый: к выположенным участкам профиля приурочены озеровидные расширения русла, к перегибам – порожиисто-водопадные участки (рис. 5). В приустьевой части водоток разбивается на два рукава, один из которых заканчивается 14-метровым водопадом, второй – имеет множество порогов. Продольный профиль Жом-Болока резко отличается от такового р. Сенцы, расположенной в целом в аналогичных геоморфологических условиях, но без заполнения долины лавами.

В паводки при подъеме воды в р. Жом-Болок на 1–2 м и более прирусловая часть лавового потока затопливается и там идет активное дальнейшее разрушение кровли туннелей с формированием новых цепочек “пойменных” озер. Хотя в межень соединяющие их протоки преимущественно осушаются, но в озерах наблюдается те-

чение воды согласно общему уклону долины, что свидетельствует о сохранении внутрилавого стока даже при доминировании поверхностного, сконцентрированного в русле. В протоках формируется отмостка из слабоокатанных (0–1 класс) обломков лав, которые могут рассматриваться как “зачаточный” (или инициальный) аллювий. Среди галечного материала основного русла р. Жом-Болок обломков базальтовых лав довольно мало — от 0 до 4–10%, исключением являются лишь участки, расположенные ниже порогов, где доля базальтов в аллювии может возрасти до 40%.

На лавовый поток в среднем и нижнем течении реки опираются обширные конусы выноса ее притоков, в основе сложенные грубым галечно-валунным материалом (рис. 2). Сортировка отложений, которыми сложены конусы, типична для селей [33]: в вершинной части доминируют крупные валуны, средняя сложена галькой и мелкими и средними валунами с супесчаным и песчаным заполнителем, а дистальная представлена супесями с редкими прослоями гравия. Выше конусов по течению в основной долине часто наблюдаются небольшие озера или заболоченные участки, что свидетельствует о существовании здесь помех не только для поверхностного, но и для внутрилавого стока.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ КОНУСОВ ВЫНОСА

Всего в долине р. Жом-Болок нами выделено 80 конусов выноса, опирающихся на лавовый поток. Их площадь варьирует от 0.04 до 3.3 км², а общий объем составляет около 210 млн м³. Наиболее мощные конусы выноса в устьях притоков приурочены к участкам среднего и нижнего течения, где они занимают от 15 до 25% площади дна (рис. 2, табл. 1). При этом наиболее крупные конусы приурочены к левому борту долины — склонам хр. Кропоткина; их совокупный объем составляет более 98 млн м³.

Преобладают конусы выноса с объемами менее 1 млн м³ (1 класс), как правило, расположенные в устьях небольших водотоков 1-го, реже 2-го порядка. Наиболее крупные конусы объемом от 5 до 20 млн м³ (4 и 5 классы) приурочены к устьям водотоков 3–4 порядка. Однако конусы выноса некоторых крупных притоков частично разрушены в результате боковой эрозии как р. Жом-Болок, так и самих притоков. Попытки восстановить их примерную изначальную площадь по аналогии с другими конусами долины, имеющими правильную веерообразную форму, показали, что в результате береговой эрозии могло быть размыто от 10 до 25% их изначального объема. Наиболее сильно разрушен конус в устье р. Обтой (№ 59).

Сложены конусы преимущественно грубым материалом, среди которого доминируют валуны гранитоидов, однако в дистальных частях преобладают маломощные (до 0.2 м) супесчано-суглинистые отложения с включением щебня базальтового состава, которые непосредственно контактируют с лавовым потоком, а также заполняют существующие в нем пустоты. Ближе к проксимальной части конуса мощность рыхлого материала постепенно увеличивается до 0.5 м, в нем прослеживаются до трех слаборазвитых слоев погребенных почв толщиной до 5–6 см, отмечается горизонтальная слоистость по механическому составу, появляются включения гравия гранитного состава. В этом тонкодисперсном материале отмечены следы мерзлотных процессов: на поверхности конуса здесь наблюдаются полигоны неправильной формы размером около 3–4 м, ограниченные раскрытыми трещинами шириной до 1–3 см, которые прослеживаются на глубину до 0.3 м. Далее вверх по профилю конуса крутизна его поверхности постепенно увеличивается от 1–3° в дистальной части до 8–10° в проксимальной. Доля и размер крупнообломочного материала также возрастают — появляются галька и мелкие, а затем средние и крупные валуны (размером до 0.6–1.0 м), которые слагают конус с поверхности, формируя плотную отмостку. В составе валунного и галечного материала преобладают граниты, гранито-гнейсы, диориты, габброиды, реже — мраморы. Значительные участки поверхности конусов задернованы, а в проксимальной части они обычно покрыты лиственным лесом: диаметр стволов отдельных экземпляров достигает 0.5 м, высота — до 15 м. На залесенных участках появляются задернованные ложбины шириной до 3–4 м и глубиной до 1–2 м, в днищах которых иногда отмечаются лишь маломощные ручейки с расходом <0.2 м³/с без врезанных русел. Ложбины окаймлены валами высотой от 1 до 2 м, сложенными валунным материалом 1–2 класса окатанности, валуны слагают и днища ложбин. Более активные современные водотоки с расходом более 10 м³/с нередко отмечаются не в центральной части конусов, а по их периферии — на границе конуса и борта долины. Вдоль русел водотоков периодически наблюдаются небольшие современные паводковые выбросы материала в виде гальки и песка. Подобное строение конусов свидетельствует о том, что в настоящее время они достаточно стабильны: не наблюдаются ни их активный рост, ни деградация (рис. 6).

Так как нам известно время наиболее мощного излияния, лавы которого заполнили долину практически целиком, т.е. фактически возраст поверхности лав, на которую опираются данные конусы, то мы можем примерно оценить темпы денудации в бассейнах притоков реки за последние 13 тыс. лет. Для этого были определены пло-



Рис. 6. Строение конуса II (№ 57) в устье р. Шарза.

1 — залесенные участки с грубообломочным, преимущественно валунным материалом; 2 — участки с редкой древесно-кустарниковой растительностью, сложенные в основном галечно-валунным материалом, периодически затрагиваемые разливами р. Шарза; 3 — зона с травянистой растительностью с преобладанием галечного материала с тонкообломочным заполнителем, иногда затрагиваемая разливами р. Жом-Болок; 4 — зона ежегодного разрушения конуса р. Жом-Болок в паводки.

щади водосборов 23 левобережных притоков р. Жом-Болок в его среднем и нижнем течении и рассчитана скорость денудации в их бассейнах (табл. 2). Данный показатель колеблется в достаточно широких пределах, в среднем достигая 23.67 мм/тыс. л. При этом для наиболее крупных водотоков 3—4 порядка (Хадарус, Шарза, Баян-Жалга и др.) он составляет в среднем 21.25 мм/тыс. л., а для небольших водотоков 1—2 порядка — 24.96 мм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом полученные нами цифры несколько больше скорости денудации, рассчитанной для хр. Кропоткина за период юры-миоцена по результатам трекового анализа апатитов [15], которая составила 17.5 мм/тыс. л. Но с конца плиоцена начался период неотектонической активизации региона, который продолжался в течение всего четвертичного периода, соответственно с этим может быть связано и возрастание скорости денудации в речных бассейнах по периферии воздымающегося блока хр. Кропоткина, обрамленного зонами активных разломов.

На поверхности разломы выражены в виде многочисленных зон дробления и трещиноватости, вследствие чего коренные породы в бассейнах водотоков сильно дезинтегрированы. Активному проявлению гравитационных процессов способствует и высокая сейсмичность территории. Так, например, к зоне сочленения Главного Саянского и Окино-Жомболокского разломов приурочены сильнейшие палеоземлетрясения с магнитудой 6—7, происходившие около 400, 600, 1800, 4700, 7600 и 9800 л. н. [19, 34]. Непосредственно Окино-Жомболокский разлом относится к наиболее активным структурам региона [35]. Амплитуда смещений по нему в голоцене по данным [19] составила 60—70 м, а средняя скорость смещения соответственно 6—7 мм/год. К зоне разлома приурочены и современные (происходившие с 1900 г.) землетрясения магнитудой 4.1—5 [17—19]. В соответствии с данными О.В. Луиной и соавт. [36], сейсмогравитационные деформации (гравитационно-склоновые процессы, инициируемые сейсмическими толчками) могут развиваться уже при магнитуде 4.2, причем зона сейсмического воздействия может распростра-

Таблица 2. Параметры конусов выноса и скорости денудации в водосборных бассейнах левых притоков р. Жом-Болок за последние 13 тыс. лет

Конусы выноса				Водотоки			Скорость денудации, мм/тыс. л
№	площадь, км ²	объем, млн м ³	класс по объему	длина, м	порядок	площадь бассейна, км ²	
25	0.209	1.36	2	1659	2	5.89	17.8
27	0.444	4.49	3	2428	2	12.07	28.6
28	0.378	3.94	3	3491	1	9.40	32.2
31	0.135	1.33	2	1441	2	3.905	26.2
37	0.409	6.30	4	1779	3	8.724	55.6
38	0.131	1.45	2	1159	2	2.769	40.2
48	0.325	4.12	3	1676	2	4.53	70.0
50	0.551	4.50	3	2298	2	17.944	19.3
51	0.332	1.27	2	2526	2	6.124	15.9
54	0.918	4.37	4	4902	3	39.76	8.5
56	0.731	7.30	4	3121	3	16.27	34.5
57	2.049	12.12	5	9064	4	74.94	12.4
58	0.386	2.99	3	5812	3	17.94	12.8
60	0.181	0.83	1	2586	2	11.60	5.5
61	3.377	18.57	5	19021	4	41.42	34.5
69	0.228	1.76	2	1066	2	7.868	17.2
83	0.037	0.25	1	719	1	0.93	20.7
91	0.076	0.55	1	638	1	0.86	49.2
92	0.061	0.27	1	2538	1	0.85	24.4
93	0.008	0.05	1	313	1	0.60	6.4
94	0.005	0.004	1	685	1	0.41	0.8
116	2.026	5.46	4	9752	4	112.87	3.7
117	0.820	7.58	5	11910	3	72.58	8.0

няться на расстояние до 300 км от эпицентра. В результате сейсмических толчков, помимо обвалов, усиливаются также оползневые, лавинные процессы, активизируется и сход селей [37–39].

Бассейны небольших притоков практически целиком попадают в приразломные зоны повышенной трещиноватости, где материал на склонах подготовлен к транспортировке. Возможно, с этим связаны несколько более высокие темпы денудации в бассейнах водотоков низких порядков. У более крупных водотоков непосредственно в зоне разлома находятся лишь их приустьевые части. Однако в их долинах на спутниковых снимках хорошо дешифрируются значительные объемы ледникового материала. Они сформировали конусы выноса преимущественно за счет его перераспределения, о чем свидетельствует хорошая обработка в них валунов и гальки. Конусы выноса таких притоков, как правило, более крупные, местами они практически перекрывают днище до-

лины р. Жом-Болок. Очевидно, что часть материала, выносимого такими притоками, сразу же поступала непосредственно в русло основной реки. Кроме того, в периоды паводков и р. Жом-Болок, и его притоки размывают конусы выноса и уносят часть отложенного в них материала (о чем мы писали выше), который также принимает участие в формировании аллювия основной реки. Объем этого материала при расчетах не учитывался, т.е. реальные скорости денудации в крупных водотоках явно несколько выше, и мы можем считать полученные данные лишь среднеминимальными темпами денудации.

В чем же специфика формирования селевых конусов долины р. Жом-Болок? Сравнение современных продольных профилей этой реки и расположенного выше по течению соседнего притока р. Оки – р. Сенцы – позволило [4] заключить, что мощность жомболокского лавового потока в среднем течении реки может достигать 150 м (см.

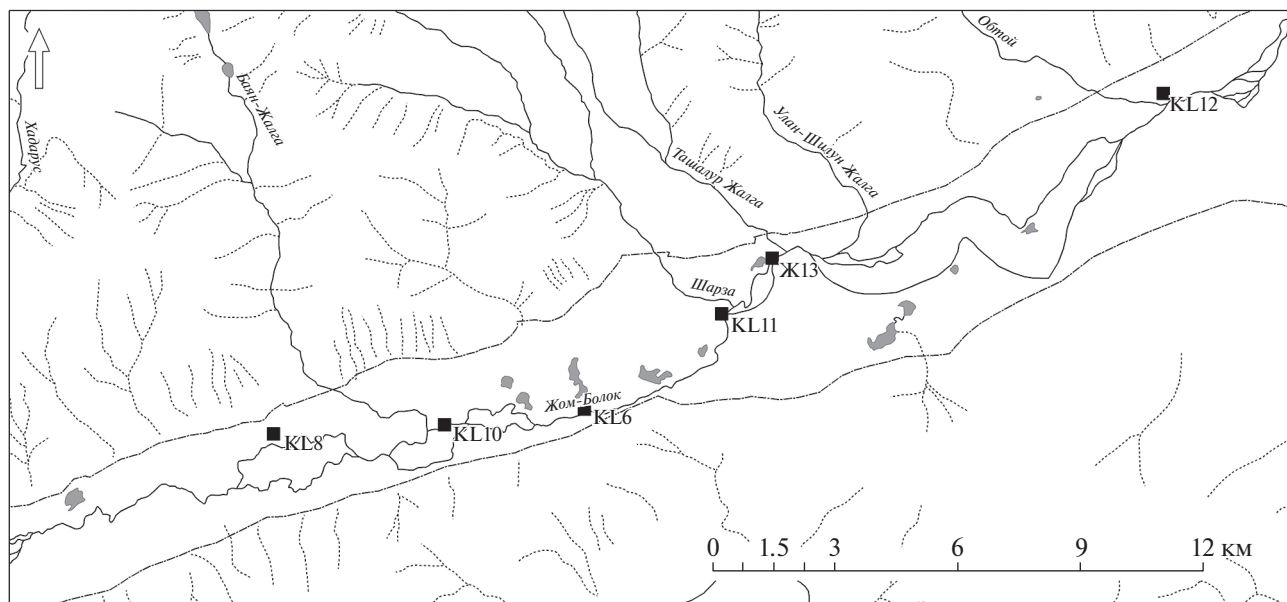


Рис. 7. Схема расположения точек отбора проб галечной фракции аллювия р. Жом-Болок.

рис. 5), такого же мнения придерживаются и другие исследователи [10, 24]. Следовательно, даже если мощность потока базальтов и несколько меньше, то после их излияния все боковые притоки р. Жом-Болок на рассматриваемом участке оказались перегорожены лавой с последующим формированием подпрудных озер, как это обычно и происходит в таких случаях [3, 9, 40]. Необходимо подчеркнуть, что висячих притоков в долине р. Сенцы, которую мы рассматриваем как долину-аналог, не затронутый вулканизмом, нет. Следовательно, скорее всего их не было и в долине р. Жом-Болок. Собственно, в верхнем течении реки три подпрудных озера сохранились и в настоящее время [41, 42]. Постепенно озера в приустьевых частях притоков были заполнены перетолженным селями ледниковым, флювиогляциальным и склоновым материалом; впоследствии зона аккумуляции распространилась и на поверхность лавового потока, и селевый материал частично перекрыл его. Таким образом, мы не можем исключать наличие переуглубленных врезов в приустьевых частях притоков р. Жом-Болок в его среднем и нижнем течении (выше гряд конечной морены). Если этот факт подтвердится, то можно будет говорить и о еще более значительных темпах денудации в бассейнах притоков по сравнению с рассчитанными.

Когда же были сформированы основные объемы конусов выноса? Весьма активное селеформирование нередко наблюдается на этапе деградации ледников, когда происходит переотложение ледникового материала тальными водами. Однако, по данным исследований на сопредельной террито-

рии [30, 43, 44], максимальная селевая активность региона пришлась на начало голоцена. В частности, С.А. Макаровым и А.А. Черкашиной [44] впервые были получены оценки возраста по ^{14}C погребенных слабо развитых почв из голоценовых селевых конусов на правобережье р. Иркут у подножья хр. Мунку-Сардык. В результате ими выделено три этапа селевой активности голоцена: высокая (около 10 тыс. кал. л. н.), средняя (3 тыс. кал. л. н. — современность) и низкая (интервал между 10 и 3 тыс. кал. л. н.). Активизация селеформирования около 10 тыс. кал. л. н., по мнению исследователей, определялась тем, что количество осадков в начале голоцена превосходило современный уровень. Скорее всего, близкая ситуация была и в бассейне р. Жом-Болок.

Как повлияло формирование обширных конусов выноса на развитие долины р. Жом-Болок? Селеформирование в притоках оказало значительное влияние на развитие долины в поствулканический этап, в первую очередь, оно сказалось на плановых очертаниях ее современного русла. В частности, рост конусов вызывал его отжимание к противоположному борту долины: на снимках и картах это хорошо видно (см. рис. 4). Вынос тонкодисперсного материала приводил также к заполнению лавовых пустот и, соответственно, препятствовал подлавному стоку. Это способствовало формированию озер и заболоченных участков в днище выше по течению обширных конусов выноса. С этим процессом мы отчасти связываем и появление поверхностного стока в долине р. Жом-Болок близ места впадения ее левого притока р. Бурсаг. Помимо увеличения вод-

Таблица 3. Состав галечной фракции аллювия р. Жом-Болок (нижнее течение)

№ точки	Петрографический состав, %					
	гранитоиды	гнейсы	габбро	кварциты	мраморы	молодые базальты
Русловой аллювий						
KL8	68	10	18	6	—	—
KL10	38	—	—	20	—	42
KL11	38	28	30	—	—	4
Ж13	83	—	—	7	—	10
KL12	58	4	2	22	6	8
Пойменный аллювий						
KL6	—	—	—	—	—	100

ности, важным фактором здесь оказался именно вынос рекой наряду с грубообломочным материалом и большого количества мелкообломочной составляющей, что привело к кольматированию внутрилавовых пустот и возникновению выше конуса выноса в долине р. Жом-Болок системы озер Бурсагай-Нур, которые фактически являются подпрудными. Сток из озер и положил начало современному руслу р. Жом-Болок. На космических снимках хорошо видно, как с ростом конуса русло реки постепенно смещалось к правому борту долины, о чем свидетельствуют фрагменты брошенных старых русел.

Кроме того, активный привнос селевого материала повлиял и на состав аллювия реки. Судя по данным петрографического (рис. 7, табл. 3) и минералогического анализов отложений в русле р. Жом-Болок, в них в настоящее время абсолютно доминирует материал, вынесенный притоками. То есть современный русловой аллювий р. Жом-Болок сформирован в значительной мере за счет перемытого материала конусов выноса, поэтому содержание обломков базальтов в нем, как правило, не превышает 4–10%. Что касается поймы, то участки, которые при полевых исследованиях мы изначально посчитали цокольными, на деле также оказались эрозионными: данные гранулометрического и минералогического анализов показали, что на коренном цоколе там залегает не супесчаный пойменный аллювий, а пролювий — отложения дистальной части конусов выноса.

ВЫВОДЫ

Анализ собранного материала позволяет заключить, что после излияния основного объема лав — на протяжении последних 13 тыс. лет — в приустьевых частях долин притоков р. Жом-Болок активно формировались селевые конусы выноса, которые смещали русло основной реки,

способствовали кольматированию лавовых пустот и, как следствие, возникновению подпрудных озер в днище долины. Также они в значительной мере повлияли на состав современного аллювия р. Жом-Болок. Скорость денудации за рассматриваемый период в бассейнах левобережных притоков реки, дренирующих хр. Кропоткина, в среднем составила около 24 мм/тыс. л. Причем для водотоков 1–2 порядка этот показатель практически достигает 25 мм/тыс. л., а для водотоков 3–4 порядка — немногим превышает 21 мм/тыс. л. Однако в последнем случае очевидно, что это лишь среднеминимальная скорость, так как часть материала сразу же выносилась в русло р. Жом-Болок, а сами конусы выноса более крупных водотоков, сложенные преимущественно переотложенным селями позднеплейстоценового ледниковым и водно-ледниковым материалом, во многих случаях впоследствии оказались частично размыты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Сбор данных осуществлен при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00967), бурение в долине р. Сенцы проведено в рамках проекта № 20-45-380002, анализ материала выполнен в рамках госзаданий Института географии РАН № 0148-2019-0005, географического факультета МГУ № AAAA-A16-116032810055-0 и Института земной коры СО РАН № РК AAAA-A17-117022250069-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярмолюк В.В., Лебедев В.И., Сугорокова А.М., Брагин В.Ю., Литасов Ю.Д., Прудников С.Т., Аракелянц М.М., Лебедев В.А., Иванов В.Г., Козловский А.М. Восточно-Тувинский ареал новейшего вулканизма Центральной Азии: этапы, продукты и характер вулканической активности // Вулканология и сейсмология. 2001. № 3. С. 3–32.

2. Ярмолюк В.В., Никифоров А.В., Иванов В.Г. Строе-ние, состав, источники и механизм долинных из-лияний лавовых потоков Жом-Болок (голоцен, Южно-Байкальская вулканическая область) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 5. С. 41–59.
3. Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Кудряшова Е.А., Ле-бедев В.И., Сугоракова А.М. Крупнейшие долин-ные излияния в кайнозой Азии: особенности стро-ения, состава и условия формирования “лавовой реки” долины Малого Енисея // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 3–20.
4. Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Ar- zhannikova A.V., and Orlova L.A. Jom-Bolok Holocene volcanic field in the East Sayan Mts., Siberia, Russia: structure, style of eruptions, magma compositions, and radiocarbon dating // Bull. of Volcanol. 2011. Vol. 73. P. 1279–1294.
5. Ivanov A.V., Demonterova E.V., Huaiyu H., Perepelov A.B., Travin A.V., and Lebedev V.A. Volcanism in the Baikal rift: 40 years of active-versus-passive model discussion // Earth-Science Reviews. 2015. Vol. 148. P. 18–43.
6. Базаров Д.Б., Антощенко-Оленев И.В. Селенгин-ское среднегорье и Джидинский горный район / Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. С. 163–210.
7. Антощенко-Оленев И.В. Кайнозой Джидинского района Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1975. 127 с.
8. Лебедева Е.В. Перестройки речной сети: причины и факторы // Геоморфология. 2012. № 3. С. 21–32.
9. Лебедева Е.В. Влияние лавовых потоков на строе-ние долин и развитие речной сети // Геоморфоло-гия. 2016. 3. С. 78–91.
10. Демонтерова Е.И., Аржанников С.Г., Аржанникова А.В., Иванов А.В. Долина Вулканов в Восточном Саяне / Наука из первых рук. 2015. Т. 53/54. № 5/6. Код до-ступа <https://scfh.ru/papers/dolina-vulkanov-v-vo-stochnom-sayane/>
11. Arzhannikov S.G., Ivanov A.V., Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Jolivet M., Voronin V.I., Buyantuev V.A., and Oskolkov V.A. Age of Jombolok lava field (East Say- an): evidence from dendrochronology and radiocarbon dating // Russian Geology and Geophysics. 2017. Vol. 58. P. 20–36.
12. Francis Joseph's Land. — Land Viewer | EOS [Элек- тронный ресурс]. Режим доступа: <https://eos.com/landviewer> (дата обращения: 01.09.2020)
13. Лазерные дальномеры Leica DISTO, лазерные сканеры Leica, 3D обмеры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://disto-leica.ru> (дата обраще- ния: 01.09.2020)
14. Уфимцев Г.Ф., Немчинов В.Г. Окинское плоскогор-ье в новейшей структуре юга Восточной Сибири // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 6. С. 979–987.
15. Аржанникова А.В., Жоливе М., Аржанников С.Г., Вассалло Р., Шове А. Возраст формирования и де- струкции мезозой-кайнозойской поверхности вы- равнивания в Восточном Саяне // Геология и гео- физика. 2013. Т. 54. № 7. С. 894–905.
16. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впа- дины Прибайкалья. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 177 с.
17. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколе- ние). Серия Ангара-Енисейская. Лист N-47 Ниж- неудинск. Объяснительная записка. СПб.: Карто- графическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 652 с.
18. Николаев В.В., Демьянович М.Г. Сейсмоструктура Окинское плоскогорья (Восточный Саян) // Сей-смогеология Восточной части Алтае-Саянской горной области / Труды Ин-та геологии и геофи- зики. Новосибирск: Наука, 1978. Вып. 399. С. 42–48.
19. Аржанникова А.В., Аржанников С.Г. Сейсмострук- тура Алтае-Саянской горной области [Электрон- ный ресурс] // Тувинские землетрясения 2011–2012 гг. / Мат-лы науч. совещ. по базовому проекту ТувИКОПР СО РАН VIII.78.1.4 “Напряженное со- стояние сейсмоопасных зон Тувы: оценка сейсми- ческой безопасности на основе сейсмических исследований и данных сети сейсмических стан- ций”. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2014. С. 4–9. Электрон. версия печат. публ. — доступ из “Docplayer.ru”.
20. Олюнин В.Н. Неотектоника и оледенение Восточ- ного Саяна. М.: Наука, 1965. 127 с.
21. Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M., Arzhanniko- va A.V., Vassallo R., Chauvet A., Bourlès D., and Chauvet F. History of late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland (southern Siberia) // Qua- ternary Science Reviews. 2012. Vol. 49. P. 16–32.
22. Аржанников С.Г., Броше Р., Жоливе М., Аржаннико- ва А.В. К вопросу о позднеплейстоценовом оледе- нении юга Восточного Саяна и выделение конеч- ных морен MIS 2 на основе бериллиевого датиро- вания (^{10}Be) ледниковых комплексов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 11. С. 1917–1933.
23. Щетников А.А., Безрукова Е.В., Кербер Е.В., Белозе- рова О.Ю., Кузьмин М.И., Иванов Е.В., Крайнов М.А., Филинов И.А., Нечаев И.О. Первые результаты теф- рохронологических исследований позднеплейсто- цен-голоценовых вулканических извержений в до- лине р. Жом-болок (Восточный Саян) // ДАН. 2019. Т. 486. № 3. С. 336–340.
24. Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., and Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Val- ley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by mi- crotephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments // Journal of Asian Earth Sciences. 2019. Vol. 173. P. 291–303.
25. Щетников А.А., Безрукова Е.В., Филинов И.А., Ива- нов Е.В., Кербер Е. В. Озерный морфолитогенез в долине вулканов (Восточный Саян) // География и природные ресурсы. 2016. № 3. С. 33–38.
26. Мельников Е.С., Гравис Г.Ф., Конченко Л.А., Молча- нова Л.С. Карта криогенных геологических про- цессов криолитозоны России (м-б 1:7500000) // Итоги фундаментальных исследований Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1977. С. 279–286.
27. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Светлаков А.А., Ко- зырева Е.А., Васильчук Ю.К. Литология и строение бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плос- когорье, Восточные Саяны) // Арктика и Антарк- тика. 2017. № 2. С. 136–149. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23037>

28. Захаров В.В., Кичигина Н.В. Роль речного стока в формировании русловых процессов высокогорной области Восточного Саяна (в верховьях рек Иркутта, Китоя, Оки) // Рельеф и экзогенные процессы гор / Мат-лы Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию Л.Н. Иванова. Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2011. Т. 2. С. 76–79.
29. Масютина Ю.А. Экзогенный морфогенез Окинско-плоскогогорья (Восточный Саян). Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск: ТГУ, 2019. 23 с.
30. Лапердин В.К., Тржцинский Ю.Б. Экзогенные геологические процессы и сели Восточного Саяна. Новосибирск: Наука, 1977. 103 с.
31. Перов В.Ф. Селеведение. Уч. пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2012. 272 с.
32. Выркин В.Б., Опекунова М.Ю. Особенности строения речных долин на территории Окинско-плоскогогорья // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 106–113.
33. Лаврушин Ю.А. Особенности динамик и высокоскоростного осадконакопления водокаменных селевых потоков горных долин и склонов / Бюл. комис. по изуч. четвертич. периода. 2018. № 76. С. 110–134.
34. Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С. Палеоземлетрясения Прибайкалья: методы и результаты датирования // Геодинамика и тектонофизика. 2010. № 1. С. 55–74.
35. Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434.
36. Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.А. Закономерности проявления и модели локализации опасных геологических процессов при сейсмогенной активизации разломов на юге Сибири и в Монголии // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 8. С. 1294–1313.
37. Казаков Н.А. О возможном механизме формирования сейсмогенных лавин // Мат-лы гляциол. исслед. 2000. Вып. 88. С. 102–106.
38. Казаков Н.А. Сейсмогенные факторы селевого процесса в низкогорье (на примере о. Сахалин) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. № 1. С. 75–81.
39. Kazakov N. and Kudryavtsev S. Conditions of formation of seismogenic landslides on Sakhalin Island. Selected issues, MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 265. 04012 doi.org/https://doi.org/10.1051/mateconf/2019265004012
40. Лебедева Е.В. Виды воздействия вулканической и поствулканической деятельности на флювиальный рельеф // Геоморфология. 2019. № 4. С. 49–66.
41. Сквитина Т.М. Плотинные озера Саяно-Байкальской Становой горной области // Геоморфология. 2002. № 3. С. 79–88.
42. Щетников А.А. Озера Окинско-плоскогогорья // Геоморфология. 2002. № 3. С. 88–95.
43. Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Kozireva E.A., and Pellinen V.A. Debris flows of 28 June 2014 near the Arshan village (Siberia, Republic of Buryatia, Russia) // Landslides. 2016. Vol. 13. No. 1. P. 129–140. https://doi.org/10.1007/s10346-015-0661-7
44. Макаров С.А., Черкашина А.А. Изучение селевой активности по данным радиоуглеродного датирования гумусовых горизонтов погребенных голоценовых почв // Геоморфология. 2020. № 1. С. 96–106.

Debris cones in Zhom-Bolok river valley (Eastern Sayan): structure, formation features and impact on the development of the watercourse

E. V. Lebedeva^{a,#}, D. V. Mishurinsky^{a,b,##}, V. A. Pellinen^{c,###}, T. M. Skovitina^{c,####}, and D. V. Mikhalev^{b,#####}

^a Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^c Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia

[#]E-mail: ekaterina.lebedeva@gmail.com

^{##}E-mail: mishurinsk@mail.ru

^{###}E-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

^{####}E-mail: skovit@crust.irk.ru

^{#####}E-mail: mikhalev.dmitry@gmail.com

The bottom of the trough of Zhom-Bolok River along the entire length (about 70 km) was covered by flow of basaltic lavas about 13 ka BP. At present, extensive debris cones formed by river's tributaries that mainly composed of debris flows material are developed on top of the lava flow. Eighty cones with a total volume of 210 million m³ were recorded in the valley; the largest of them are located in the middle and lower reaches of the river, where they occupy from 15 to 25% of valley's bottom surface area. During the last 13 ka the average denudation rate in the catchment areas of the Zhom-Bolok River' tributaries, draining Kropotkin Ridge, was 0.024 mm per year. Obviously, this rate is only the average minimum, because in some cases, the cones of larger streams are partially washed away by the river. Soil development and forest coverage on the debris cones at present indicate that at present the debris flow activity is low. According to research data in the adjacent territory, the peak of debris flow formation activity occurred at the beginning of the Holocene. Along with the

effusion of lavas, the removal of significant volumes of loose material by tributaries influenced the morphology and development of the Zhom-Bolok river valley. In the post-eruptive period, the runoff initially went through lava tubes. It is partially preserved to this day. Cones development caused the filling of lava cavities with loose material, preventing the intralava drain, and promoted the formation of lakes at the bottom of the valley and the displacement of the river channel. The total incision of the river into the lava flow during the post-eruptive stage reached 6–7 m. During floods, an erosive floodplain is actively formed in the valley, including due to erosion of the distal parts of the cones. The results of petrographic and mineralogical analyzes of the Zhom-Bolok river channel alluvium suggest that currently it is mostly dominated by material carried by tributaries with the content of basalt fragments not exceeding 10%.

Keywords: debris flow, river channel, debris cone, lava flow, dammed lake, denudation, Buryatia, East Siberia

ACKNOWLEDGMENTS

The data were collected with support of the RFBR (project No. 18-05-00967), drilling in the Sentsa river valley was carried out within the framework of the project No. 20-45-380002, the analysis of results was done in the frame of the topics of the State Administration of the Institute of Geography RAS No. 0148-2019-000, Faculty of Geography Lomonosov Moscow State University No. AAAA-A16-116032810055-0 and Institute of the Earth's Crust No. RK AAAA-A17-117022250069-1.

REFERENCES

1. Yarmolyuk V.V., Lebedev V.I., Sugorakova A.M., Bragin V.Yu., Litasov Yu.D., Prudnikov S.T., Arakelyants M.M., Lebedev V.A., Ivanov V.G., and Kozlovskii A.M. *Vostochno-Tuvinskii areal noveishego vulkanizma Tsentral'noi Azii: etapy, produkty i kharakter vulkanicheskoi aktivnosti* (The Eastern Tuva region of recent volcanism in Central Asia: periods, products and types of volcanic activity). *Vulkanologiya i seismologiya*. 2001. No. 3. P. 3–32. (in Russ.)
2. Yarmolyuk V.V., Nikiforov A.V., and Ivanov V.G. *Stroenie, sostav, istochniki i mekhanizmy dolinnykh izliyanii lavovykh potokov Zhom-Bolok (golocen, Yuzhno-Baikal'skaya vulkanicheskaya oblast')* (Structure, composition, sources and mechanism of valley eruptions of lava flows Zhom-Bolok (Holocene, South Baikal volcanic region)). *Vulkanologiya i seismologiya*. 2003. No. 5. P. 41–59. (in Russ.)
3. Yarmolyuk V.V., Kozlovskij A.M., Kudryashova E.A., Lebedev V.I., and Sugorakova A.M. *Krupneishie dolinnye izliyaniya v kainozoe Azii: osobennosti stroeniya, sostava i usloviya formirovaniya "lavovoi reki" doliny Malogo Eniseya* (Largest valley outpourings in the Cenozoic of Asia: features of the structure, composition and conditions of formation of the "lava river" of the Maly Yenisei valley). *Vulkanologiya i seismologiya*. 2004. No. 4. P. 3–20. (in Russ.)
4. Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Arzhannikova A.V., and Orlova L.A. Jom-Bolok Holocene volcanic field in the East Sayan Mts., Siberia, Russia: structure, style of eruptions, magma compositions, and radiocarbon dating. *Bull. of Volcanol.* 2011. Vol. 73. P. 1279–1294.
5. Ivanov A.V., Demonterova E.V., Huaiyu H., Perepelov A.B., Travin A.V., and Lebedev V.A. Volcanism in the Baikal rift: 40 years of active-versus-passive model discussion. *Earth-Science Reviews*. 2015. Vol. 148. P. 18–43.
6. Bazarov D.B. and Antoschenko-Olenev I.V. *Selenginskoe srednegor'e i Djidinskii gornii raion / Nagor'ya Pribaikal'ya i Zabaikal'ya* (The Selenga middle mountains and the Djindinsky mountain region / Highlands of Baikal and Transbaikalia). Moscow: Nauka (Publ.), 1974. 163–209 p. (in Russ.)
7. Antoschenko-Olenev I.V. *Kainozoi Djidinskogo raiona Zabaikal'ya* (Cenozoic of the Dzhidinsky region of Transbaikalia). Novosibirsk: Nauka (Publ.), 1975. 127 p. (in Russ.)
8. Lebedeva E.V. *Perestroiki rechnoi seti: prichiny i factory* (Reconstruction of the river network: causes and factors). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2012. No. 3. P. 21–32. (in Russ.)
9. Lebedeva E.V. *Vliyanie lavovykh potokov na stroenie dolin i razvitie rechnoi seti* (The influence of lava flows on the structure of valleys and the development of the river network). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2016. No. 3. P. 78–91. (in Russ.)
10. Demonterova E.I., Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V., and Ivanov A.V. *Dolina Vulkanov v Vostochnom Sayane* (Valley of Volcanoes in Eastern Sayan). *Nauka iz pervykh ruk* (Publ.). 2015. Vol. 53/54. No. 5/6. URL: <https://scfh.ru/papers/dolina-vulkanov-v-vostochnom-sayane/> (in Russ.)
11. Arzhannikov S.G., Ivanov A.V., Arzhannikova A.V., Demonterova E.I., Jolivet M., Voronin V.I., Buyantuev V.A., and Oskolkov V.A. Age of Jombolok lava field (East Sayan): evidence from dendrochronology and radiocarbon dating. *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58. P. 20–36.
12. Francis Joseph's Land. - Land Viewer|EOS [Electronic data]. Access way: <https://eos.com/landviewer> (access date: 01.09.2020)
13. Lazernye dal'nomery Leica DISTO, lazernye skanery Leica, 3D obmery [Electronic data]. Access way: <https://disto-leica.ru> (access date: 01.09.2020)
14. Ufimtsev G.F. and Nemchinov V.G. *Okinskoe ploskogor'e v noveishei strukture yuga Vostochnoi Sibiri* (Okinskoe plateau in the newest structure of the South of Eastern Siberia). *Geologiya i geofizika*. 2001. Vol. 42. No. 6. P. 979–987. (in Russ.)
15. Arzhannikova A.V., Zholive M., Arzhannikov S.G., Vassallo R., and Shove A. *Vozrast formirovaniya i destruktivnoi mezozoi-kainozoiskoi poverhnosti vyrovnivaniya v Vostochnom Sayane* (Age of formation and destruction of the Mesozoic-Cenozoic alignment surface in the

- Eastern Sayan). *Geologiya i geofizika*. 2013. Vol. 54. No. 7. P. 894–905. (in Russ.)
16. Florensov N.A. *Mezozoiskie i kainozoiskie vpadiny Pribaikal'ya* (Mesozoic and Cenozoic depressions of the Baikal region). Leningrad: AN SSSR (Publ.), 1960. 177 p. (in Russ.)
17. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federacii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Angaro-Enisejskaya. List N-47 Nizhneudinsk. Ob'yasnitel'naya zapiska*. SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI (Publ.), 2012. 652 p. (in Russ.)
18. Nikolaev V.V. and Dem'yanovich M.G. *Seismotektonika Okinskogo ploskogor'ya (Vostochnyi Sayan)* (Seismotectonics of the Okinskoe plateau (Eastern Sayan)). *Seismogeologiya Vostochnoi chasti Altae-Sayanskoi gornoj oblasti: Trudy In-ta geologii i geofiziki*. Novosibirsk: Nauka (Publ.), 1978. Vol. 399. P. 42–48. (in Russ.)
19. Arzhannikova A.V. and Arzhannikov S.G. *Seismotektonika Altae-Sayanskoi gornoj oblasti* (Seismotectonics of the Altai-Sayan mountain region) [*Elektronnyi resurs*], *Tuvinskie zemletryaseniya 2011–2012 gg.: Mat-ly nauchn. Soveshch. po Bazovomu projektu TuvIKOPR SO RAN VIII.78.1.4 "Napryazhennoe sostoyanie seismopasnykh zon Tuvy: otsenka seismicheskoi bezopasnosti na osnove seismicheskikh issledovaniy i dannykh seti seismicheskikh stancii"*. Kyzyl: TuvIKOPR SO RAN (Publ.), 2014. P. 4–9. — Elektron. versiya pechat. publ. — Dostup iz "Docplayer.ru". (in Russ.)
20. Olyunin V.N. *Neotektonika i oledenenie Vostochnogo Sayana*. (Neotectonics and glaciation of the Eastern Sayan.). Moscow: Nauka (Publ.), 1965. 127 p. (in Russ.)
21. Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M., Arzhannikova A.V., Vassallo R., Chauvet A., Bourlès D., and Chauvet F. History of late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland (southern Siberia). *Quaternary Science Reviews*. 2012. Vol. 49. P. 16–32.
22. Arzhannikov S.G., Broshe R., Zholive M., and Arzhannikova A.V. *K voprosu o pozднеpleistocenovom oledenenii yuga Vostochnogo Sayana i vydelenie konechnykh moren MIS 2 na osnove berillievogo datirovaniya (¹⁰Be) lednikovyykh kompleksov* (On the late Pleistocene glaciation of the South of the Eastern Sayan and identification of MIS 2 terminal moraines based on beryllium Dating (¹⁰Be) of glacial complexes). *Geologiya i geofizika*. 2015. Vol. 56. No. 11. P. 1917–1933. (in Russ.)
23. Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Kerber E.V., Belozero O.Yu., Kuz'min M.I., Ivanov E.V., Krajnov M.A., Filinov I.A., and Nechaev I.O. *Pervye rezul'taty tefrochronologicheskikh issledovaniy pozднеpleistocen-golocenovykh vulkanicheskikh izverzheniy v doline r. Zhombolok (Vostochnyi Sayan)* (First results of tephrochronological studies of late Pleistocene-Holocene volcanic eruptions in the Zhom-Bolok river valley (Eastern Sayan)). *DAN*. 2019. Vol. 486. No. 3. P. 336–340. (in Russ.)
24. Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., and Krivonogov S.K. Late Glacial to Holocene volcanism of Jom-Bolok Valley (East Sayan Mountains, Siberia) recorded by microtephra layers of the Lake Kaskadnoe-1 sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019. Vol. 173. P. 291–303.
25. Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Filinov I.A., Ivanov E.V., and Kerber E.V. *Ozernyi morfolitogenez v doline vulkanov (Vostochnyi Sayan)* (Lake morpholithogenesis in the valley of volcanoes (Eastern Sayan)). *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016. No. 3. P. 33–38. (in Russ.)
26. Mel'nikov E.S., Gravis G.F., Konchenko L.A., and Molchanova L.S. *Karta kriogennykh geologicheskikh processov kriolitozony Rossii (m-b 1:7500000)* (Map of cryogenic geological processes in the cryolithozone of Russia (m-b 1:7500000)). *Itogi fundamental'nykh issledovaniy Zemli v Arktike i Subarktike*. Novosibirsk: Nauka (Publ.), 1977. P. 279–286. (in Russ.)
27. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Svetlakov A.A., Kozyreva E.A., and Vasil'chuk Yu.K. *Litologiya i stroenie bugrov pucheniya v doline r. Sentsa (Okinskoe ploskogor'e, Vostochnye Sayany)* (Lithology and structure of heaving mounds in the Sentsa river valley (Okinskoe plateau, Eastern Sayans)). *Arktika i Antarktika*. 2017. No. 2. P. 136–149. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23037> (in Russ.)
28. Zakharov V.V., Kichigina N.V. *Rol' rechnogo stoka v formirovaniy ruslovykh processov vysokogornoi oblasti Vostochnogo Sayana (v verhov'yakh rek Irkuta, Kitoya, Oki)* (The role of river flow in the formation of riverbed processes in the high-mountain region of the Eastern Sayan (in the upper reaches of the Irkut, Kitoy, and Oka rivers)). *Rel'ef i ekzogennyye processy gor: materialy Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 100-letiyu L.N. Ivanovskogo*. Irkutsk: Institute of geography SO RAS (Publ.), 2011. Vol. 2. P. 76–79. (in Russ.)
29. Masyutina Yu.A. *Ekzogennyyi morfogenez Okinskogo ploskogor'ya (Vostochnyi Sayan)*. PhD thesis. Tomsk: TGU (Publ.), 2019. 23 p. (in Russ.)
30. Laperdin V.K. and Trzhcinskiy Yu.B. *Ekzogennyye geologicheskyye processy i seli Vostochnogo Sayana* (Exogenous geological processes and debris flows of the Eastern Sayan). Novosibirsk: Nauka (Publ.), 1977. 103 p. (in Russ.)
31. Perov V.F. *Selevedenie* (Debris flows). Moscow: Geograficheskii f-t MGU (Publ.), 2012. 272 p. (in Russ.)
32. Vyrkin V.B. and Opekunova M.Yu. *Osobennosti stroeniya rechnykh dolin na territorii Okinskogo ploskogor'ya* (Features of the structure of river valleys on the territory of the Okinskoe plateau). *Geografiya i prirodnye resursy*. 2015. No. 2. P. 106–113. (in Russ.)
33. Lavrushin Yu.A. *Osobennosti dinamik i vysokoskorostnogo osadkonakopleniya vodokamennykh selevykh potokov gornyykh dolin i sklonov* (Features of dynamics and high-speed sedimentation of water-stone mudflows in mountain valleys and slopes). *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*. 2018. No. 76. P. 110–134. (in Russ.)
34. Smekalin O.P., Chipizubov A.V., and Imaev V.S. *Paleozemletryaseniya Pribaikal'ya: metody i rezul'taty datirovaniya* (Paleoearthquakes of the Baikal region: methods and results of Dating). *Geodinamika i tektonofizika*. 2010. No. 1. P. 55–74. (in Russ.)
35. Lunina O.V. *Tsifrovaya karta razlomov dlya plitsenchetvertichnogo etapa razvitiya zemnoi kory yuga Vo-*

- stochnoi Sibiri i sopredel'noi territorii Severnoi Mongolii* (Digital fault map for the Pliocene-Quaternary stage of development of the earth's crust in the South of Eastern Siberia and the adjacent territory of Northern Mongolia). *Geodinamika i tektonofizika*. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 407–434. (in Russ.)
36. Lunina O.V., Andreev A.V., and Gladkov A.A. *Zakonomernosti proyavleniya i modeli lokalizatsii opasnykh geologicheskikh processov pri seismogennoi aktivizatsii razlomov na yuge Sibiri i v Mongolii* (Regularities of manifestation and localization models of dangerous geological processes during seismogenic activation of faults in southern Siberia and Mongolia). *Geologiya i geofizika*. 2014. Vol. 55. No. 8. P. 1294–1313. (in Russ.)
 37. Kazakov N.A. *O vozmozhnom mekhanizme formirovaniya seismogennykh lavin* (Possible mechanism of formation of seismogenic avalanches). *Mat-ly glyaciol. issled.* 2000. Vol. 88. P. 102–106. (in Russ.)
 38. Kazakov N.A. *Seismogennyye faktory selevogo processa v nizkogor'e (na primere o. Sakhalin)* (Seismogenic factors of the mudflow process in the low mountains (on the example of Sakhalin)). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2007. No. 1. P. 75–81. (in Russ.)
 39. Kazakov N. and Kudryavtsev S. Conditions of formation of seismogenic landslides on Sakhalin Island. Selected issues, *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 265. 04012
<https://doi.org/10.1051/mateconf/2019265004012>
 40. Lebedeva E.V. *Vidy vozdeistviya vulkanicheskoi i post-vulkanicheskoi deyatel'nosti na flyuvial'nyi rel'ef* (Types of impact of volcanic and post-volcanic activity on fluvial relief). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 4. P. 49–66. (in Russ.)
 41. Skovitina T.M. *Plotinnye ozera Sayano-Bajkal'skoi Stanovoi gornoj oblasti* (Dam lakes of the Sayano-Baikal Stanovoy mountain region). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2002. No. 3. P. 79–88. (in Russ.)
 42. Shchetnikov A.A. *Ozera Okinskogo ploskogor'ya* (Lakes of the Okinskoye plateau). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2002. No. 3. P. 88–95. (in Russ.)
 43. Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Kozireva E.A., and Pellinen V.A. Debris flows of 28 June 2014 near the Arshan village (Siberia, Republic of Buryatia, Russia). *Landslides*. 2016. Vol. 13. No. 1. P. 129–140.
<https://doi.org/10.1007/s10346-015-0661-7>
 44. Makarov S.A. and Cherkashina A.A. *Izucheniye selevoi aktivnosti po dannym radiouglerodnogo datirovaniya gumusovykh gorizontov pogrebennykh golocenovykh pochv* (Study of mudflow activity based on radiocarbon dating of humus horizons of buried Holocene soils). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2020. No. 1. P. 96–106. (in Russ.)