

УДК 551.2

ХРОНОЛОГИЯ ДОЛИННЫХ ИЗЛИЯНИЙ В ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ (ДАННЫЕ К–Ar-ДАТИРОВАНИЯ)

© 2003 г. В. В. Ярмолюк, М. М. Аракелянц, В. А. Лебедев,
В. Г. Иванов, А. М. Козловский, В. И. Лебедев, А. В. Никифоров,
А. М. Сугоракова, Д. Н. Байкин, академик В. И. Коваленко

Поступило 07.02.2003 г.

В Центральной и Восточной Азии вулканические поля позднего кайнозоя группируются в пространственно обособленные и тем не менее близкие по особенностям строения и развития области [1]. Проблемы формирования этих областей, а также причины, определившие позднекайнозойскую внутриплитную активность в регионе, в последние годы вызывают повышенный интерес [1, 2]. Эти вопросы решаются в основном на примере достаточно крупных интервалов вулканической истории как для вулканической провинции в целом, так и для отдельных ее вулканических областей. Попытки проведения анализа для более узких интервалов времени сталкиваются с большой неопределенностью сопоставлений из-за отсутствия геохронологической основы для надежной корреляции вулканических событий. Здесь приведены данные систематических К–Ar-геохронологических исследований долинных лавовых излияний Южно-Байкальской вулканической области, которые характеризуют позднейший этап формирования этой крупнейшей в Центральной Азии области, и оценены факторы, определившие такой тип вулканических излияний.

Южно-Байкальская вулканическая область (ЮБВО) представляет крупный (330 × 450 км) ареал позднекайнозойских вулканических пород, охватывающий область сочленения хребтов Восточного Саяна, ак. Обручева и Хамардабана. Формирование области началось более 30 млн. лет назад [3]. Пик вулканической активности пришелся на ранний миоцен (22–17 млн. лет). В среднем миоцене ЮБВО была расчленена трехлучевой системой грабенов (Тункинским, Хубсугульским, Окинским), и с этого времени и практически до конца плиоцена (до 3 млн. лет) вулканическая деятельность, постепенно затухая, протекала в

пределах этих грабенов. Новый этап высокой вулканической активности пришелся на последние 3 млн. лет. Вулканизм этого этапа осуществлялся независимо от тройной системы грабенов и проявился по периферии области на достаточно большом удалении от ее центра. Ведущей формой вулканических излияний стали долинные потоки (или лавовые реки) субщелочных (гавайиты) и щелочных (базаниты) лав основного состава. Выделяется два района развития лавовых рек, связанные с бассейном верховьев рек Большой и Малый Енисей и с бассейном левобережья верхнего течения р. Джиды.

Бассейн верховьев рек Б. и М. Енисей (рис. 1). До недавнего времени лавовые реки этого района практически оставались неизученными, в том числе и геохронологическими методами. Первые сведения были получены при исследованиях строения Восточно-Тувинского лавового нагорья [4]. В этой районе в верховьях Б. Енисея нами выявлены две генерации долинных потоков (рис. 1). Ранняя из них, прослеженная на расстоянии более 40 км, представлена останцами высокой террасы (до 500 м над уровнем тальвега), фрагменты которых сохранились в бортах современной глубоководной долины р. Б. Енисей. Терраса сложена лавовыми потоками, общая мощность которых достигает 300 м и более. Возраст этих долинных потоков оценивается в интервале 1750–1650 тыс. лет (табл. 1, № 1–3). Вторая генерация долинных излияний формирует современное основание долины р. Б. Енисей и прослеживается на расстоянии более 100 км. Лавовая река обтекает ледниковые морены, местами на поверхности лав залегают маломощные отложения позднейшего оледенения. Вулканическая толща пропилена узкими каньонами на глубину до 50 м, однако основание ее не вскрыто. Возраст лав оценивается в 50 тыс. лет (табл. 1, № 4) [4].

В бассейне р. М. Енисей (рис. 1) выделяется ряд разновозрастных долинных потоков. Наиболее древний из них установлен в среднем течении

*Институт геологии рудных месторождений,
петрографии, минералогии и геохимии
Российской Академии наук, Москва*

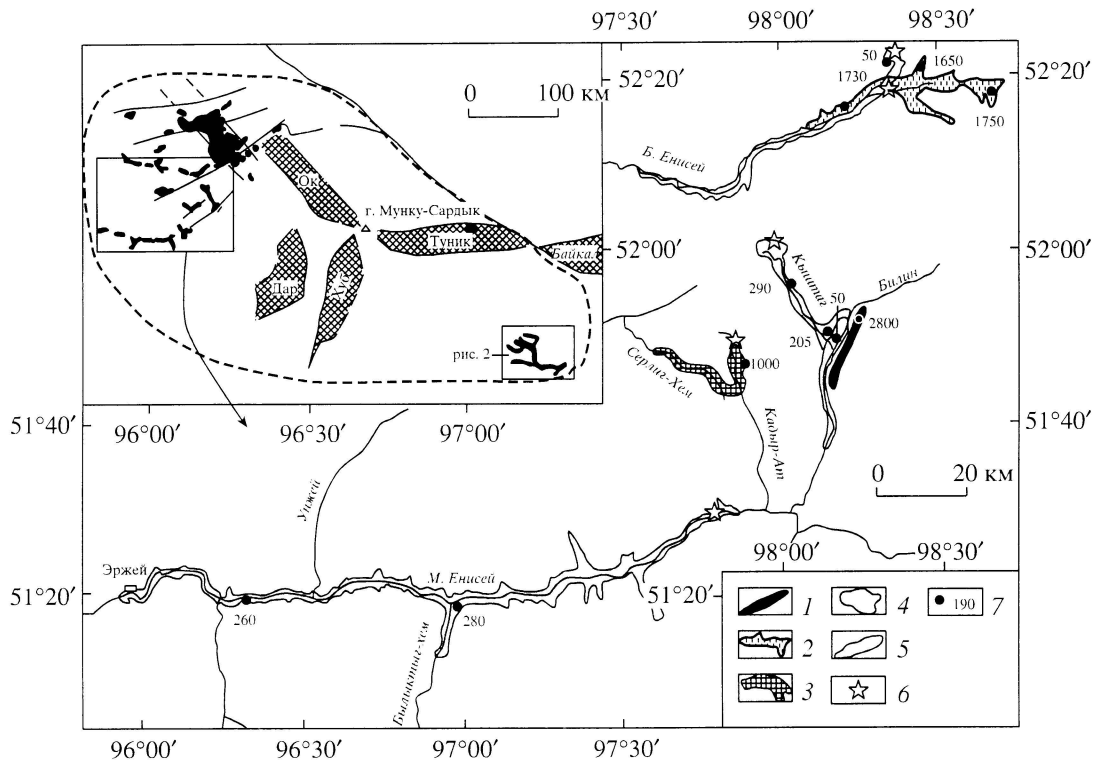


Рис. 1. Схема размещения долинных лавовых потоков в бассейне верховьев рек Большой и Малый Енисей. На врезке приведена схема строения ЮБВО и положение в ней районов развития лавовых рек. 1–5 – лавовые потоки с возрастом, тыс. лет: 1 – ~2800, 2 – 1650–1750, 3 – ~1000, 4 – 190–290, 5 – ~50; 6 – вулканические аппараты; 7 – места отбора проб и их возраст в тыс. лет. На врезке показаны: пунктирные контуром – границы ЮБВО, черными полями – районы вулканизма с возрастом <3 млн. лет, косой клеткой выделены грабены: Ок – Окинский, Тунк – Тункинский, Хуб – Хубсугульский, Дар – Дархатский.

р. Билин напротив устья р. Кыштаг. Останцы лавовой толщи имеют мощность до 20–30 м и сохранились на высоких террасах, подверженных значительной ледниковой экзарации. Лавы залегают на породах раннего палеозоя, образующих здесь основание палеодолины, положение которого в настоящее время примерно на 150 м выше уровня русла р. Билин. Возраст этих излияний оценивается в 2.8 млн. лет (табл. 1, № 5).

Следующими по времени формирования стали долинны лавовые потоки в междуречье верховий рек Кадыр-Ат и Серлиг-Хем. Лавовое поле широкой лентой протяженностью более 20 км прослеживается через пологий в этом месте современный водораздел Б. и М. Енисея, фиксируя древнюю долину, отвечающую верховьям р. Серлиг-Хем. Перехват ее более молодой долиной р. Кадыр-Ат произошел относительно недавно. Поэтому лавовая толща прорезана руслом реки весьма незначительно. В большей степени она подвержена ледниковой экзарации, вскрывшей ее более чем на 50 м. Возраст этих долинных потоков оценивается в 1 млн. лет (табл. 1, № 6).

Крупные долинны излияния произошли около 270 тыс. лет назад, когда в долине М. Енисея сформировалась одна из крупнейших в мире лавовых рек. Ее потоки прослеживаются на расстоянии 170 км. Лавы залегают на цокольной террасе, высотой около 10–20 м. Мощность лавовой толщи изменяется от 350 м вблизи центра излияний, фиксируемого крупным шлаково-лавовым конусом, до 10–15 м на окончании лавовой реки вблизи пос. Эржей. Результаты К–Аг-датирования лав по пробам, отобранным из удаленных друг от друга участков лавовой реки, показывают практически один и тот же (в пределах погрешности) возраст – 280 ± 60 и 260 ± 60 тыс. лет (табл. 1, № 7, 8).

По-видимому, в это же время произошли излияния в долине р. Кыштаг (правый приток р. Билин). Здесь лавовые потоки прослеживаются на расстоянии более 30 км от верховьев реки до ее выхода в широкую долину р. Билин, где лавы растекаются на площади более 20 км². Породы этой лавовой реки характеризуются порфировым строением и содержат до 20% крупных вкрапленников оливина, пироксена и плагиоклаза. Нами

Таблица 1. Результаты К–Аг-датирования долинных лавовых излияний в Южно-Байкальской вулканической области

| № п.п. | № пробы | Порода | Лавовые потоки в долинах | Место отбора проб | | К, мас. % | ⁴⁰ Аг _{рад} , нг/г | Возраст (±1.6σ), тыс. лет |
|-----------------------------------------|----------|---------|------------------------------------------------------|---------------------------|---------------|-----------|----------------------------------------|---------------------------|
| | | | | широта, с.ш. | долгота, в.д. | | | |
| Лавовые реки бассейна р. Большой Енисей | | | | | | | | |
| 1 | ПР-4/2 | Базанит | Верхней части р. Б. Енисей (верхняя лавовая терраса) | 52°20.67' | 98°27.88' | 1.68 | 0.204 | 1750 ± 100 |
| 2 | БЕ-1/18 | Базальт | | 52 14.76 | 98 05.88 | 0.8 | 0.096 | 1730 ± 150 |
| 3 | ПЛ-2/5 | То же | | 52 18.55 | 98 41.33 | 1.05 | 0.120 | 1650 ± 130 |
| 4 | УА-1/5 | Базанит | р. Б. Енисей (нижняя лавовая терраса) | 52 22.32 | 98 20.88 | 1.68 | 0.0056 | 50 ± 20 |
| Лавовые реки бассейна р. Малый Енисей | | | | | | | | |
| 5 | БЛ-4 | Гавайит | р. Билин (верхняя лавовая терраса) | 51 52.72 | 98 15.28 | 1.42 | 0.27 | 2800 ± 200 |
| 6 | БЛ-2/3 | То же | р. Кадыр-Ат | 51 47.47 | 97 53.00 | 1.57 | 0.109 | 1000 ± 100 |
| 7 | БЛ-1/3 | » | р. Кыштаг | 41 54.72 | 98 03.53 | 1.07 | 0.022 | 290 ± 70 |
| 8 | БЛ-3/1 | » | | 51 51.22 | 98 09.83 | 1.49 | 0.020 | 205 ± 50 |
| 9 | МЕ-1/10 | » | р. М. Енисей | 51 19.20 | 96 58.89 | 1.25 | 0.024 | 280 ± 60 |
| 10 | МЕ-1/5 | Базальт | | 51 19.67 | 96 20.75 | 1.45 | 0.026 | 260 ± 60 |
| 11 | БЛ-3/2 | Гавайит | р. Билин (нижняя лавовая терраса) | 51 50.87 | 98 12.33 | 1.20 | 0.0042 | 50 ± 30 |
| Лавовые реки бассейна р. Джиды | | | | | | | | |
| 12 | СГ-2/4 | Гавайит | р. Сангина–р. Хамней | 50 49.05 | 103 41.91 | 1.3 | 0.25 | 2800 ± 250 |
| 13 | СГ-1/5 | То же | | 50 47.79 | 103 34.86 | 1.36 | 0.29 | 3100 ± 250 |
| 14 | ДЖ-14/4 | » | р. Мыла–р. Хамней | 50 45.59 | 103 20.36 | 1.8 | 0.39 | 3150 ± 250 |
| 15 | ДЖ-14/3 | » | | 50 45.48 | 103 21.06 | 1.62 | 0.32 | 2850 ± 250 |
| 16 | ДЖ-14/5 | » | | 50 41.64 | 103 28.24 | 1.49 | 0.27 | 2600 ± 200 |
| 17 | ХМ-1/1* | » | | Приустьевая часть р. Мыла | | 1.36 | 0.284 | 3030 ± 370 |
| 18 | ХМ-1/16* | » | | | | 1.44 | 0.265 | 2670 ± 310 |
| 19 | ДХ-4/8 | » | р. Дархинтуй–низовья р. Хамней | 50 38.49 | 103 26.54 | 1.31 | 0.20 | 2250 ± 200 |
| 20 | ДХ-5/9 | » | | 50 30.31 | 103 44.71 | 1.50 | 0.20 | 1900 ± 150 |
| 21 | ДЖ-14/1 | » | р. Джиды | 50 23.93 | 104 09.39 | 1.30 | 0.12 | 1300 ± 120 |
| 22 | ДЖ-14/9 | » | | 50 27.63 | 104 21.40 | 1.49 | 0.13 | 1260 ± 110 |
| 23 | ДХ-4/1 | Базанит | р. Хобол | 50 37.27 | 104 14.63 | 2.62 | 0.22 | 1200 ± 100 |
| 24 | ХЦ-3/1 | То же | р. Хурай-Цакир | 50 28.30 | 103 26.04 | 2.15 | 0.086 | 580 ± 80 |

Примечание. Исследования выполнены в ИГЕМ РАН на масс-спектрометрическом комплексе по методике [5]; звездочкой отмечены анализы проб, выполненные в ИГХ СО РАН, аналитик В.Н. Смирнов.

получены две датировки гавайитов этой лавовой реки (табл. 1, № 9, 10) – одна по валовой пробе (290 тыс. лет), вторая по материалу основной массы породы, очищенной от вкрапленников (205 тыс. лет). В пределах аналитической погрешности эти датировки совпадают, однако мы полагаем, что более древнее значение, возможно, связано с наличием в фенокристаллах избыточного глубинного аргона.

Наиболее молодыми лавовыми образованиями в бассейне р. М. Енисей являются долинские потоки, берущие начало от района устья р. Кыштаг и прослеживающиеся вниз по р. Билин на расстоянии более 40 км. В верхней части лавовой ре-

ки ее лавовые потоки вложены в толщу пород Кыштагского лавового поля и, подобно последним, подвержены сильной ледниковой экзарации, стершей морфологические различия между этими лавовыми реками. Тем не менее породы обеих лавовых рек легко различаются по петрографическому составу: Кыштагские лавы, как отмечалось, порфиоровые, лавы Билинского потока существенно афировые и содержат лишь мелкие вкрапленники оливина. Лавы Билинского потока вскрыты руслом р. Билин всего на 20–30 м, что свидетельствует о невысоком уровне эрозии и, следовательно, об относительной молодости лав. К–Аг-возраст пород оценивается в 50 ± 30 тыс.

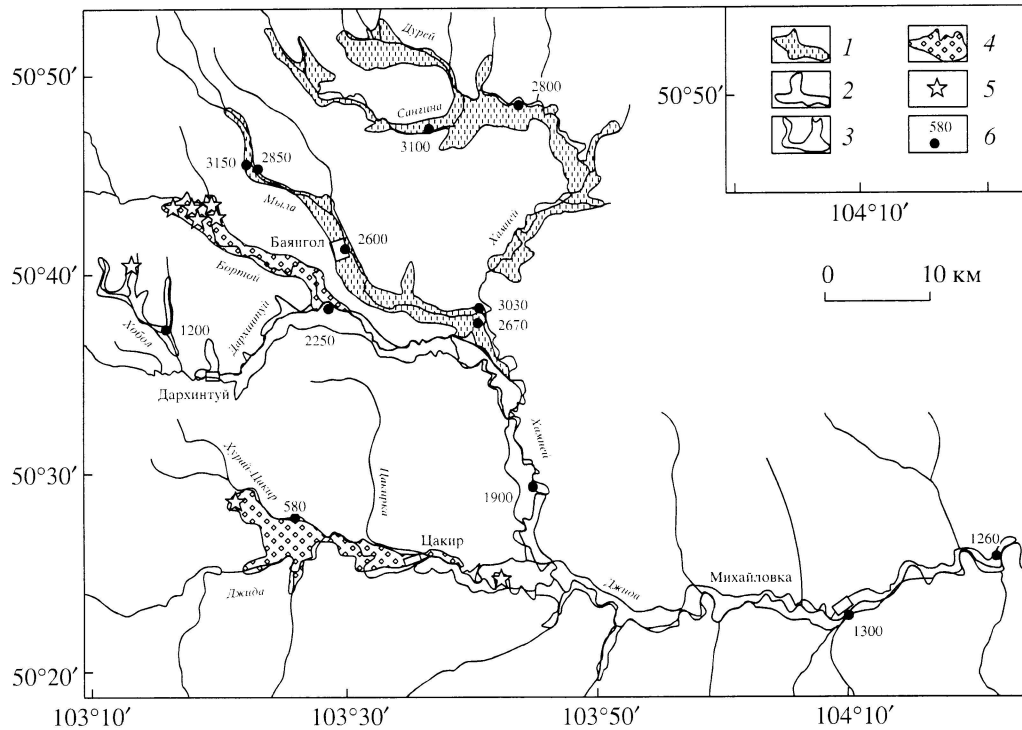


Рис. 2. Схема размещения долинных лавовых потоков в бассейне левобережья верхнего течения р. Джида. Положение района показано на врезке рис. 1. 1–4 – лавовые потоки с возрастом, тыс. лет: 1 – ~2600–3150, 2 – 1900–2250, 3 – ~1200–1300, 4 – ~600; 5 – вулканические аппараты; 6 – места отбора проб и их возраст в тыс. лет.

лет (табл. 1, № 11) и, таким образом, подтверждает этот вывод.

В бассейне левобережья верхнего течения р. Джида известен ряд протяженных долинных лавовых потоков, распространенных на площади ~3000 км² (рис. 2). Этот район изучался многими исследователями [6–8], но приведенные в литературе геохронологические данные в основном относились к наиболее молодым лавовым рекам, связанные с излияниями хорошо сохранившихся вулканов Бартойской группы и Хурай-Цакирского вулкана [7].

Наиболее древние долинныя излияния в этом районе произошли около 3 млн. лет назад и привели к формированию лавовых потоков по долинам рек Мыла–Хамней и Сангина–Хамней протяженностью более 40 и 50 км соответственно. Ширина лавовых шлейфов варьирует от 1 до 4 км. Лавовые толщи прорезаны современными руслами рек на разную глубину. Так, в верхней части долины р. Мыла у пос. Байягол речной долиной вскрыты лишь верхние 25–50 м лавовой толщи. Величина вреза увеличивается вниз по долине и достигает в устьевой ее части 150 м, где вскрываются породы основания лавовой толщи. В лавовой долине Сангина–Хамней речной врез достигает цоколя лавового пакета уже в средней части

лавовой реки, но практически не углубляется в него. Строение толщи, как и в долине р. Мыла, определяет серия (более 20) лавовых потоков, общая мощность которых достигает 200 м. Возраст пород, установленный по ряду определений, варьирует от 2.8 до 3.1 млн. лет (лавовая река Сангина–Хамней, табл. 1, № 12, 13) и от 2.6 до 3.15 млн. лет (лавовая река Мыла, табл. 1, № 14–18). В пределах ошибки определений эти вариации совпадают. Нами не были обнаружены следы размыва внутри лавовой толщи или наличие межбазальтовых линз осадочных пород, которые могли бы указывать на значительные возрастныя перерывы в излияниях. Среднее значение датировок соответствует ~2.9 млн. лет, и оно принято нами в качестве возраста этих лавовых потоков.

Следующими по времени формирования стали излияния в долине р. Дархингуй. Возникшие лавовые потоки прослеживались также в долину нижнего течения р. Хамней и заполнили речные долины на протяжении более 60 км лавовым покровом шириной около 2 км. Поверхность лавовой реки образует террасу, высота которой меняется от 10 м в районе ее истока у пос. Дархингуй до 40–50 м в нижней части долины Дархинтуя. Более глубокий врез наблюдается лишь в нижней части долины Хамнея, где лавовая толща вскры-

та каньоном на глубину около 110 м и тем не менее не обнажена полностью. Отметим, что вблизи выхода в долину Хамнея лавовая река входит в контакт с более древними лавовыми толщами. Здесь она следует в эрозионной долине, сформированной вдоль края упоминавшейся выше лавовой реки Мыла–Хамней, но, кроме того, ее лавовые потоки растекаются по поверхности последней, подчеркивая тем самым свой более молодой геологический возраст. Об этом же свидетельствуют данные К–Аг-датирования пород, в соответствии с которыми возраст излияний в долине Дархинтуя (табл. 1, № 19, 20) составляет около 2 млн. лет.

Одна из наиболее эффектных лавовых рек возникла около 1.3 млн. лет назад (табл. 1, № 21, 22) в связи с излияниями в долине р. Джиды. Отвечающее ей лавовое поле заполнило долину по всей ее ширине (2–4 км) на протяжении более 60 км. Центр извержений, по-видимому, располагался недалеко от верхней оконечности лавовой реки примерно в 5 км вверх по долине р. Джиды до устья р. Хамней. Здесь поверхность лавовой террасы достигает наибольшей гипсометрической отметки и понижается как к востоку, так и к западу от этого места. Лавовая толща взрезана руслом р. Джиды на глубину до 100 м, однако основание ее нигде не вскрывается, что свидетельствует о еще большей ее мощности.

Близкими по возрасту к Джидинским стали излияния базанитов по долине р. Хобол. Эта лавовая река берет начало от вулкана, расположенного в водораздельной части бассейнов рек Дархинтуй и Бортой. Она имеет протяженность около 10 км при небольшой (~30–40 м) общей мощности. Возраст ее лав оценивается в 1.2 млн. лет (табл. 1, № 23). По своему составу, и в частности по обилию мантийных ксенолитов, Хобольские лавы обычно сопоставляются с лавами Бортойских вулканитов [6, 7]. Формирование последних происходило в два этапа: около 1.17 млн. лет и около 0.8 млн. лет назад [7, 8]. Очевидно, что лавы Хобольских вулканов по времени согласуются с ранними излияниями в долине Бортоя.

Наиболее поздними в бассейне р. Джиды стали лавовые излияния по долине р. Хурай-Цакир. Здесь лавовые потоки прослеживаются от крупного шлакового конуса вниз по долине реки и затем далее по долине р. Джиды на расстоянии более 30 км при ширине лавового поля до 4 км. Речной врез в лавовую толщу относительно незначительный. Максимальной величины (около 30 м) он достигает в долине р. Джиды, где обнажены верхние потоки лавовой толщи, однако основание ее располагается ниже современного дна долины. Возраст лавовых потоков оценен в 0.58 млн. лет (табл. 1, № 24), что в целом согласуется с данными [7].

Лавовые реки и природа долинных излияний. Полученные результаты свидетельствуют, что на протяжении последних 3 млн. лет в пределах ЮБВО неоднократно происходили лавовые излияния в форме долинных потоков (лавовых рек). Общая их протяженность с учетом тех, которые в настоящем сообщении не рассматривались (например, потоков Жом-Болок [9]), составляет не менее 850 км. Эти лавовые реки формировались в ходе многократных излияний, которым в разрезах лавовых толщ отвечают отдельные лавовые потоки (от 2–3 до 12–15 м). Как правило, общая мощность лавовых толщ значительно превышает 100 м. Принимая эту оценку за среднюю мощность, при средней ширине лавовых рек около 2 км, нетрудно получить, что за рассматриваемый период времени только в ходе долинных излияний было вынесено на поверхность около 170 км³ лав.

Установленные величины возраста излияний долинных потоков в совокупности с данными об основных этапах формирования Восточно-Тувинского лавового плато, возникшего в том же интервале времени [4], позволяют выявить закономерности проявления вулканической активности в ЮБВО за последние 3 млн. лет. Выделяется не менее 12 импульсов активности (в млн. лет, жирным шрифтом – возраст долинных излияний, в скобках курсивом – время извержений в пределах Восточно-Тувинского лавового плато по (4)): 1) 3–2.8; 2) 2.1, (2.1); 3) 1.7; 4) 1.3–1.2; 5) 1, (1); 6) (0.75); 7) 0.6, (0.6); 8) (0.35–0.3); 9) 0.27–0.25; 10) (0.2–0.1); 11) 0.05; 12) <0.01 (возраст излияний Жом-Болок). Эти датировки однозначно свидетельствуют о возрастании во времени частоты вулканических излияний и, таким образом, указывают на регион как на вулканически опасный, в котором существует высокая вероятность возобновления вулканической активности, в том числе в форме катастрофических долинных излияний большой протяженности.

Долинные потоки являются отличительной формой лавовых излияний в последние 3 млн. лет истории ЮБВО. Распределение лавовых потоков согласуется с современной орографией, что указывает на формирование основных черт последней к моменту излияний. В бассейне р. Джиды ложе современных рек практически нигде не углубляется ниже тальвега древних долин, вмещающих лавовые толщи с возрастом ~2.9 млн. лет. В долине р. Билин лавовые потоки того же возраста располагаются на высоте более 150 м над уровнем реки, а в верховьях р. Б. Енисей основание долинных потоков с возрастом 1.7 млн. лет поднимается на высоту до 500 м над современным ее руслом. Эти различия связаны с разным положением районов вулканизма в пределах горной системы хребтов Саяна и Хамардабана. Джидинский ареал расположен вблизи южного подножия этой системы, поэтому формирование профиля равнове-

сия речных долин завершилось здесь достаточно быстро, по-видимому, вскоре после образования, по крайней мере, хр. Хамардабан. Бассейн р. Билин расположен в промежуточной зоне горной системы, а бассейн верховий р. Б. Енисей вблизи ее наиболее приподнятой части. Очевидно, что в последних районах активное развитие речных долин продолжается до настоящего времени, что в свою очередь свидетельствует о молодом возрасте горообразования. Отсутствие следов значительных долинных излияний в более ранние этапы формирования ЮБВО указывает на возникновение горной системы непосредственно перед началом позднеплиоценовой–плейстоценовой активизации вулканизма в регионе, т.е. ~3 млн. лет назад. Представляется, что совмещение этих двух событий не является случайным. Горообразование в Центральной Азии связывается с коллизией Индостанского и Северо-Азиатского континентов и происходило вдоль границ микроплит [10]. Возникновение горной системы Саяны–Хамардабан и отвечающих ей корней гор должно было вызвать увеличение мощности коры в пределах ЮБВО и, соответственно, оказать воздействие на астеносферную линзу мантийного плюма, расположенную в основании литосферы. По-видимому, перетекание горячей мантии в краевые части астеносферной линзы стало причиной возобновления вулканической активности на периферии ЮБВО. Формирование горной системы сопровождалось также изменением климата в регионе [11]. Начиная с 2.5 млн. лет в ее пределах с периодичностью около 100 тыс. лет происходили похолодания, сопровождавшиеся образованием мощных (до 1 км) покровных ледников [3, 4, 12]. Возникновение и последующее таяние этих ледников создавало осциллирующие нагрузки величиной до 0.1 кбар со стороны литосферы на головку мантийного плюма. Как представляется, они активизировали процессы мантийной магмогене-

рации и тем самым определили высокую периодичность лавовых излияний в плейстоцене [4, 12].

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 02–05–64196, 01–05–64260, 01–05–64082, 03–05–64585, 03–05–65209), ФЦНТП “Катастрофические процессы” (грант “Ведущие научные школы”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярмолук В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. // Геотектоника. 1995. № 5. С. 41–67.
2. Кононова В.А., Иваненко В.В., Карпенко М.И. и др. // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1986. № 11. С. 53–68.
3. Ярмолук В.В., Иванов В.Г., Коваленко В.И., Покровский Б.Г. // Петрология. 2003. № 1. С. 3–33.
4. Ярмолук В.В., Лебедев В.И., Сугоракова А.М. и др. // Вулканология и сейсмология. 2001. № 3. С. 3–32.
5. Чернышев И.В., Аракелянц М.М., Лебедев В.А., Бубнов С.Н. // ДАН. 1999. Т. 367. № 6. С. 810–814.
6. Антоценко-Оленев И.В. Кайнозой Джидинского района Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1975. 127 с.
7. Рассказов С.В., Кунк М.Дж., Лур Дж.Ф. и др. // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 6. С. 3–15.
8. Кононова В.А., Иваненко В.В., Карпенко М.И. и др. // ДАН. 1988. Т. 303. № 2. С. 454–457.
9. Ярмолук В.В., Никифоров А.В., Иванов В.Г. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 27–45.
10. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.Л. Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 311 с.
11. Кузьмин М.И., Антипин В.С., Гвоздков А.А. и др. // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 2. С. 139–156.
12. Ярмолук В.В., Кузьмин М.И. В кн.: Катастрофические процессы: и их влияние на природную среду. Т. 1. Вулканизм. М.: Изд-во РООУППГ, 2002. С. 87–117.