

## **Pb–изотопная оценка возраста модельных источников позднекайнозойских базальтов вулканического поля Чанбайшань (Пектусан) и её значение в общей Pb–изотопной систематике Центральной Азии**

Т.А. Ясныгина<sup>1</sup>, С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

**Аннотация.** По соотношению  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  источники позднекайнозойских вулканических пород основного состава поля Чанбайшань, расположенного на границе Северо-Восточного Китая и Северной Кореи, характеризуются двумя интервалами возраста: позднеархейским 3.0–2.8 млрд лет и раннепротерозойским 2.2–1.9 млрд лет. Последний интервал совпадает с оценками возраста участвующего в их генезисе компонента субдуцированных силикатных отложений, а его верхняя граница – с Pb–изотопным возрастом источника плейстоценовых вулканических пород Северо-Восточного Китая.

**Ключевые слова:** Pb изотопы, Чанбайшань, базальты, возраст источников магм.

## **Pb-isotope age estimates of model sources for late Cenozoic basalts from the Changbaishan (Pectusan) field and its significance for the general pb-isotope systematics of Central Asia**

T.A. Yasnygina<sup>1</sup>, S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** From the  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram, sources of Late Cenozoic basalts from the Changbaishan field, located on the Northeast China – North Korea border, are characterized by two age intervals: Late Archean (3.0–2.8 Ga) and Early Proterozoic (2.2–1.9 Ga). The latter interval coincides with the age estimates of the component of subducted sediments involved in their genesis and its upper boundary coincides with the Pb isotope age of the source of Pleistocene volcanic rocks in Northeast China.

**Keywords:** Pb isotopes, Changbaishan, basalts, age of magma sources.

### **Введение**

Преимущество Pb–Pb изотопной систематики заключается в том, что используемые в ней изотопы  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}$  (конечные продукты распада урана) при расчете изохронного возраста в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  не требуют определений содержания урана. Метод был разработан ещё в середине XX века, с его помощью, в частности, был получен возраст Земли по метеори-

там из Каньона Дьявола (Patterson, 1956). В настоящее время Pb–Pb изотопная систематика широко используется для решения различных геохронометрических задач. В координатах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  получают изохроны для определения возраста карбонатов (известняки, доломиты) (Горохов и др., 2019; Fölling et al., 2000; Rud'ko et al., 2001), нефти, битумов, углеродистого вещества в породах (Zhu et al., 2001; Hurst, 2002). Одно из ее приложений – оценка возраста

источников вулканических пород основного состава. Наклон изохроны в координатах  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  характеризует возраст протолита в источнике магм. Для того чтобы оценка возраста источника была корректной, породы должны относиться к одному возрастному интервалу развития магматизма. Исключается влияние коровой контаминации и постмагматических изменений.

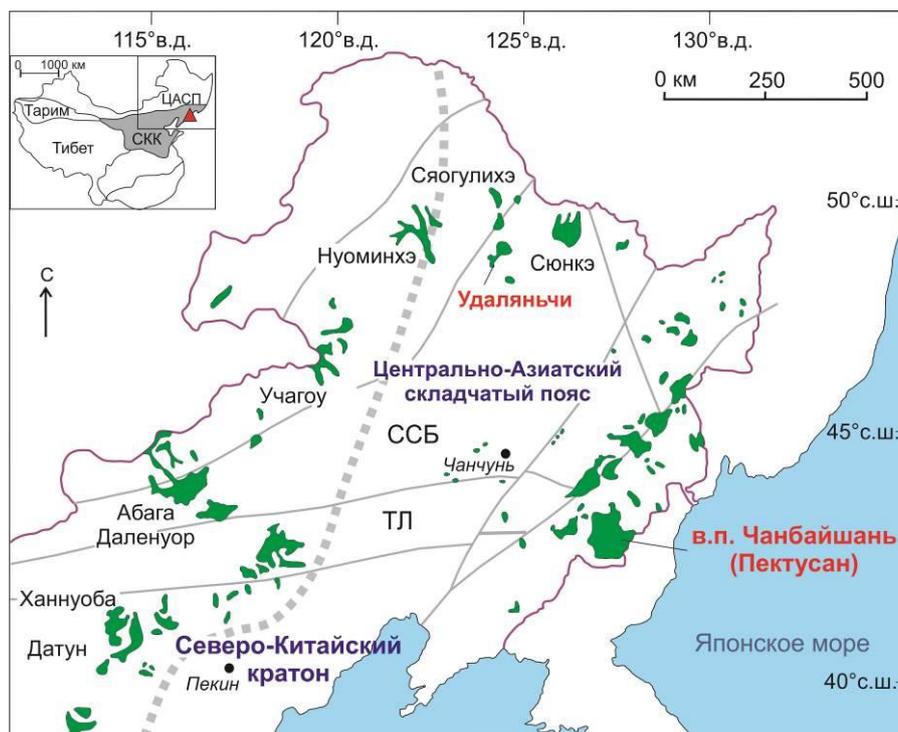
В Северо-Восточном Китае нами был детально изучен вулканизма поля Удаляньчи. В работе (Рассказов и др., 2019) для его ранней фазы (возрастной интервал 2.5–2.0 млн лет назад) по наклону Pb–Pb изохроны с использованием программы Isoplot рассчитан возраст предполагаемого источника магм  $1.884 \pm 0.055$  млрд лет, MSWD=0.67. Вулканические породы последующих извержений давали в целом более молодые оценки возраста источников (~150 млн лет) и со значительной ошибкой. Предполагается, что на более поздних этапах в интервалах 1.3–0.4 млн лет назад и <0.6 млн лет назад имело место фракционирование в магматических камерах и смешение магм разных источников.

Несмотря на то, что в Азии далеко не каждый массив данных по изотопам свинца

в базальтах подходит для построения таких изохрон, в процессе этого исследования были получены более десятка Pb–Pb оценок возраста источников базальтовых магм различных регионов. Примерно столько же рассчитано по опубликованным данным. Из-за большого количества накопленных данных возникают вопросы, с какими событиями могли быть связаны эти датировки? Каково происхождение протолитов источников? Для пород основного состава вулканического поля Чанбайшань мы попытались найти ответ на эти вопросы путем сопоставления с результатами других радиоизотопных систем.

### **Геологическое положение, возраст и состав пород**

Вулканическое поле поля Чанбайшань (Пектусан) расположено на границе Китая и Северной Кореи (рис. 1). Оно находится на восточной окраине Северо-Китайского кратона. Крупные кайнозойские вулканические поля к северу от Чанбайшаня – Удаляньчи, Нуомиинхэ, Абага и т.д. входят в Центрально-Азиатский орогенный пояс.



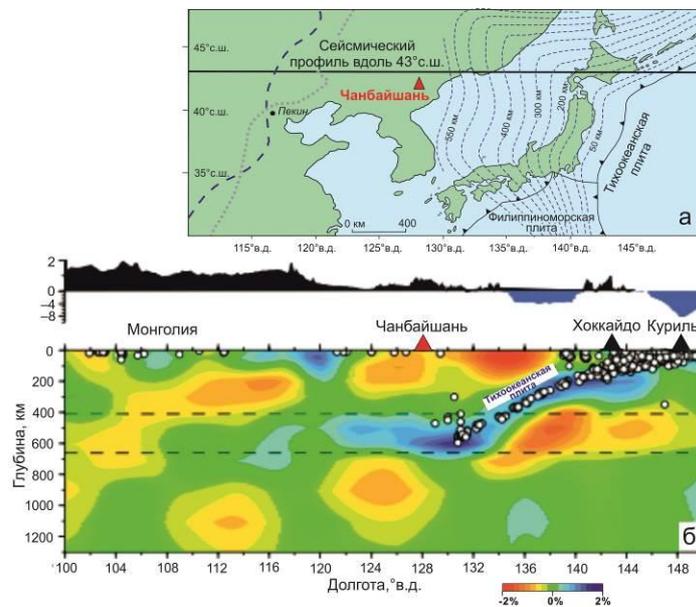
**Рис. 1.** Пространственное распределение кайнозойских внутриплитных базальтов на территории Северо-Восточного Китая (Zhang et al., 2018, с изменениями). ЦАСП – Центрально-Азиатский складчатый пояс.

тый пояс, СКК – Северо-Китайский кратон, ТЛ – террейн Ляоюань (Liaoyuan), ССБ – блок Сунляо-Силинхот (Songliao-Xilinhot). Серой штриховой линией показан гравитационный линеамент. Здесь и далее для транскрипции китайских географических названий использована система транскрипции Паллады.

**Fig. 1.** Schematic map showing distribution of Cenozoic intraplate basalts in Northeast China (Zhang et al., 2018, modified). ЦАСП, Central Asian fold belt; СКК, North China craton; ТЛ, Liaoyuan terrane; ССБ, Songliao-Xilinhot block. The gray dashed line shows the North-South gravity lineament. Hereinafter, the Palladium transcription system is used for the transcription of Chinese geographical names to Russian.

Сейсмической томографией под вулканическим полем Чанбайшань регистрируются низкоскоростные аномалии на глубинах менее 100 км и от 200 до 400 км, ниже на глубинах от 400 до 600 км определяется Тихоокеанский слэб (Huang, Zhao, 2006; Duan et al., 2009) (рис. 2). По результатам сейсмической томографии предполагается, что вулка-

ны этого поля можно отчасти рассматривать как задуговые (Duan et al., 2009), хотя при этом базальты имеют ОИВ-подобные геохимические характеристики. Китайскими авторами Чанбайшань рассматривается как регион для оценки влияния глубинной субдуцирующей плиты на внутриплитный рифтовый кайнозойский вулканизм (Liu et al., 2015).



**Рис. 2.** Положение вулканического поля Чанбайшань относительно Тихоокеанского слэба (а). Распределение скоростей Р-волн по данным сейсмической томографии высокого разрешения по разрезу вдоль 43° с.ш. (Huang, Zhao, 2006) (б). На рис. а черными линиями с треугольниками обозначены границы плит и направления субдукции. Тонкими штриховыми линиями показаны контуры поверхности Тихоокеанского слэба по геофизическим данным (Gudmundsson and Sambridge, 1998). Синей штриховой линией под континентом обозначен край слэба, стагнированного в переходной зоне мантии под Восточной Азией (Liu et al., 2017). Серой штриховой линией показан гравитационный линеамент.

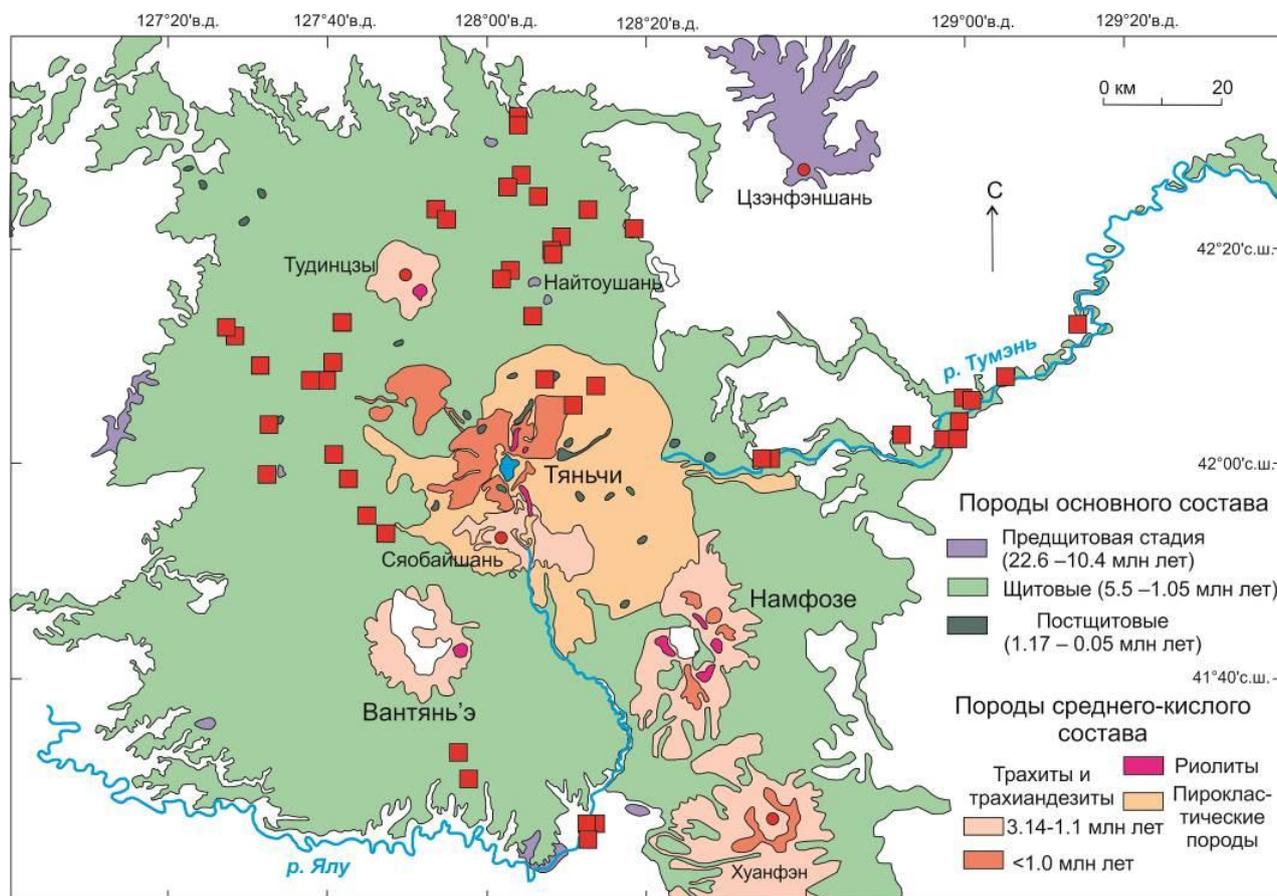
**Fig. 2.** Schematic map showing location of the Changbaishan volcanic field relative to the Pacific slab (a). Distribution of P-wave velocities according to high-resolution seismic tomography along the section along 43°N. (Huang, Zhao, 2006) (b). In the fig (a) the black lines with triangles indicate plate boundaries and subduction directions. Thin dashed lines show the contours of the Pacific Slab surface according to geophysical data of (Gudmundsson and Sambridge, 1998). The blue dashed line under the continent indicates the edge of a stagnated slab in the mantle transition zone beneath East Asia (Liu et al., 2017). The gray dashed line shows the North-South gravity lineament.

Вулканическое поле сложено породами основного состава (толеитовые и щелочные базальты, калиевые трахибазальты, шошо-

ниты) и среднего-кислого состава (трахиты, щелочные трахиты, латиты, комендиты и пантеллериты) (Basu et al., 1991; Liu R. et al.,

1998; Liu J. et al., 2015; Zhang et al., 2018 и др.). Оно включает три наиболее крупных полигенных вулкана – Тяньчи (Tianchi), Вантяньэ (Wantian'e) и Намфозе (Namphothe) (рис. 3), на которых базальты со временем сменялись породами среднего и кислого состава. Различаются также не-

сколько более мелких, преимущественно базальтовых построек. Базальты подразделяются на три возрастных интервала (см. рис. 3). В дальнейшем для оценки возраста источников по изотопам Pb используются только породы второго интервала (щитовой стадии).

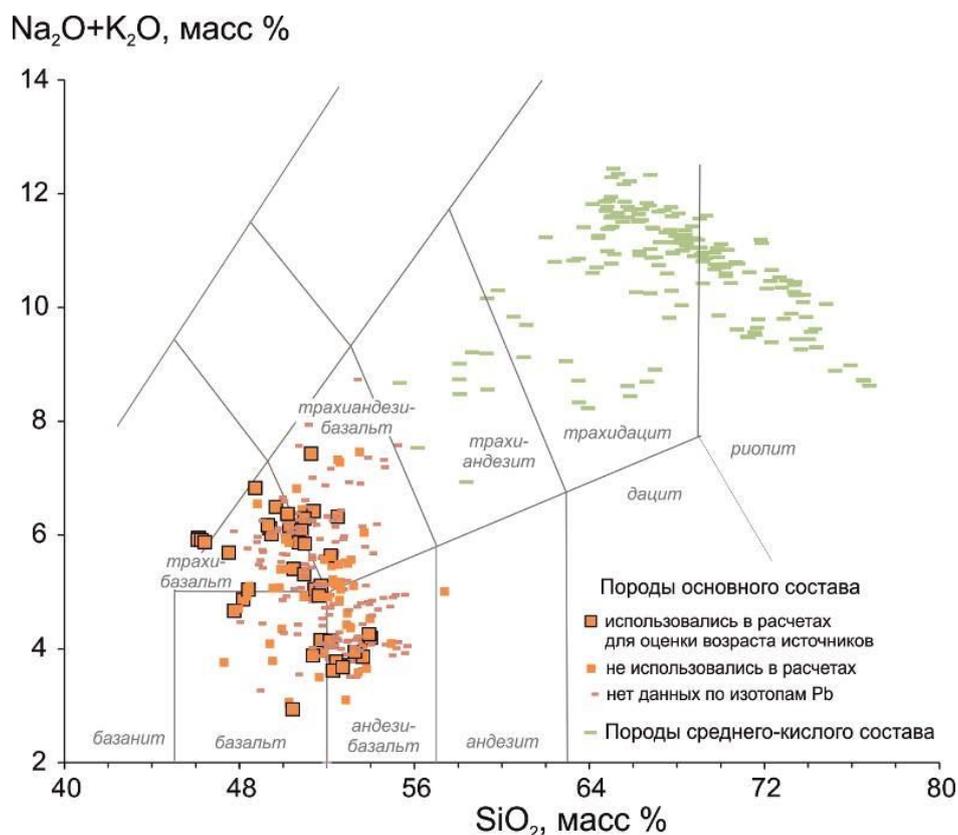


**Рис. 3.** Пространственное распределение кайнозойских пород вулканического поля Чанбайшань (Zhang et al., 2018, с изменениями). Красными квадратиками показаны места отбора образцов по (Kuritani et al., 2009; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

**Fig 3.** Spatial distribution map for Cenozoic rocks of the Changbaishan volcanic field (CVF) (Zhang et al., 2018, modified). Red squares show sample locations (Kuritani et al., 2009; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

На диаграмме рис. 4 показаны составы вулканических пород Чанбайшаня по опубликованным данным. По соотношению  $Na_2O+K_2O - SiO_2$  вулканизм в целом характеризуется как бимодальный. Среди базальтов (пород основного состава), для которых выполнялись определения микроэлементов и

изотопов Pb, выделены составы использованные для оценки возраста источников магм. На диаграмме они попадают главным образом в поля трахибазальтов, андезибазальтов и базальтов, в меньшей степени в поле трахиандезибазальтов.



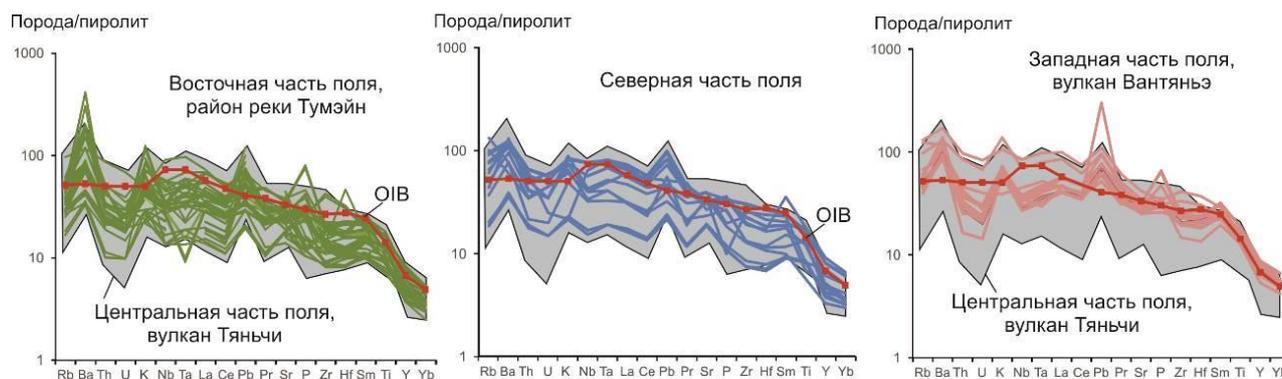
**Рис. 4.** Диаграмма Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O – SiO<sub>2</sub> (TAS) для пород вулканического поля Чанбайшань. Разделительные линии Международного союза геологических наук по (Le Bas, Streckeisen, 1991). Используются данные из обзора (Zhang et al., 2018) и из работ (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

**Fig 4.** Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> (TAS) diagram for the CVF volcanic rocks. Classification boundaries are from (Le Bas, Streckeisen, 1991). Data used are from the review (Zhang et al., 2018) and (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

### **Микроэлементы и изотопы Nd, Sr и Pb вулканических пород**

Микроэлементный состав пород вулканического поля Чанбайшань хорошо изучен. Базальты Чанбайшаня имеют внутриплитные характеристики, сравнительно высокие содержания Nb, Ta с соответствующими максимумами на нормированных спектрах. В целом они сходны со спектрами базальтов океанических островов (ОИВ), отличаются максимумами Ba, K и минимумами Th–U,

более выраженными для пород восточной части вулканического поля (рис. 5). Спектры некоторых базальтов и трахиандезибазальтов западной части вулканического поля (главным образом вулкана Вантяньэ) имеют небольшие минимумы Nb–Ta, Ti и/или Zr–Hf в сочетании с максимумами Pb и P. Это придает им некоторое сходство со спектрами вулканических пород Северо-Восточного Китая (Удаляньчи, Еркешан, Келуо и др.) (Liu et al., 2015; Choi et al., 2020 и др.).



**Рис. 5.** Микроэлементные спектры пород основного состава вулканического поля Чанбайшань. Значения для нормирования по (McDonough, Sun, 1995). Состав базальтов океанических островов (OIB) по (Sun, McDonough, 1989). Использованы данные из обзора (Zhang et al., 2018) и из работ (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

**Fig 5.** Trace element diagrams for CVF basaltic rocks. Pyrolite values for normalization are from (McDonough, Sun, 1995). Ocean island basalt (OIB) composition is after (Sun, McDonough, 1989). Data used are from the review (Zhang et al., 2018) and (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

По изотопам Sr, Pb и Nd породы вулканического поля Чанбайшань отличаются преобладанием EM1-подобных составов (Basu et al., 1991; Kuritani et al., 2009). На диаграмме  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  они соответствуют аномалии DUPAL, характерной для базальтов Южного полушария (Hart, 1984). Подобная особенность ранее отмечалась также для базальтов Северо-Восточной Японии (Tatsumoto, Nakamura, 1991), однако, последние отличаются более высоким отношением  $^{144}\text{Nd}/^{143}\text{Nd}$ . Тренд от составов, приближающихся к NHRL (Northern Hemisphere Reference Line), и EM1-подобных к компоненту DUPAL характерен в основном для базальтов и трахиандеизбазальтов западной части вулканического поля, вулкан Вантяньэ. Ещё один обогащенный компонент пород вулкана Вантяньэ на изотопных диаграммах имеет повышенные значения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и низкие  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ .

Предполагались различные варианты происхождения преобладающего (EM1-подобного) компонента: мантийный литосферный с добавлением материала молодых субдуцированных отложений Тихоокеанской плиты (Xu et al., 2019), мантийный литосферный модифицированный с добавлением материала древних субдуцированных отложений с низким  $\mu$  (Tatsumoto, Nakamura, 1991; Choi et al., 2020), рециклированная древняя океаническая кора как составляю-

щая плюма, поднимающегося из переходной зоны мантии (Андреева и др., 2014; Kuritani et al., 2019).

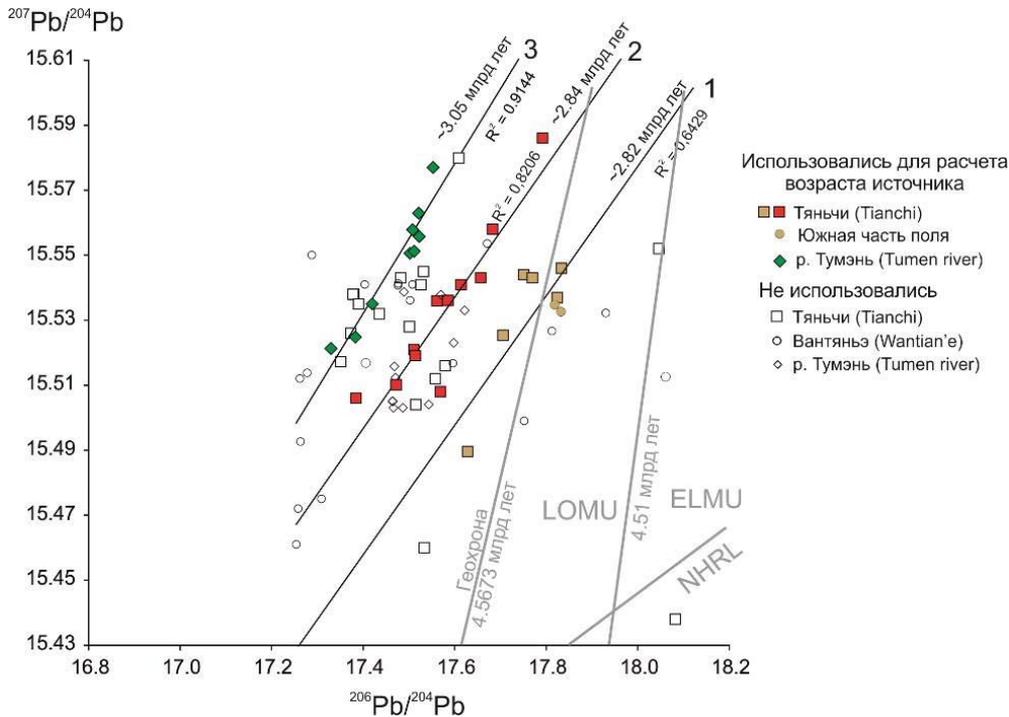
В недавней работе (Choi et al., 2020) по данным  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  базальтов нормальной щелочности вулканического поля Чанбайшань с использованием трехстадийной кривой эволюции свинца был сделан вывод об участии в их генезисе (на третьей, последней стадии) компонента древних субдуцированных силикатных отложений с пониженным значением  $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ , переработанных ~2.2–1.6 млрд лет назад. Однако, в действительности общий линейный тренд, как для всех базальтов вулканического поля Чанбайшань, так и для группы пород нормальной щелочности, отсутствует.

Метасоматическая переработка древними водными флюидами и силикатными расплавами подтверждается данными по перидотитовым ксенолитам из базальтов этой территории. При попытке определить возраст этого процесса Sm–Nd и Lu–Hf методами с помощью клинопироксенов из ксенолитов был получен широкий спектр оценок от 2.28 млрд лет до 230 млн лет. Наиболее древняя Sm–Nd датировка 3.6 млрд лет была признана сомнительной (Park et al., 2017).

**Оценка возраста источников магм по изотопам свинца**

Для оценки возраста источников изохронным методом нами использован большой массив опубликованных данных (более 250 образцов) по изотопам Pb вулканиче-

ских пород основного состава из работ (Basu et al., 1991; Wee, 2002; Kuritani et al., 2009; Zhang et al., 2018; Choi et al., 2020; Li et al., 2021). На диаграммах (рис. 6, 7) позднекайнозойские (< 5.5 млн лет) породы с  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 17.93$  разделились на четыре группы.



**Рис. 6.** Изотопные отношения ураногенного Pb ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) позднекайнозойских вулканических пород основного состава поля Чанбайшань с трендами и оценками возрастов источников магм.  $R^2$  – коэффициенты корреляции, NHRL – Northern Hemisphere Reference Line – линия, вдоль которой находятся большинство составов базальтов океанических островов северного полушария (Hart, 1984), LOMU и ELMU – поля составов источников базальтовых магм Центральной Азии с низким (low  $\mu$ ) и повышенным (elevated  $\mu$ ) значением  $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  (Рассказов и др., 2019). Разделительная линия 4.51 млрд лет между LOMU и ELMU обозначает наиболее древний возраст источника магм Центральной Азии, полученный по базальтам вулканического поля Удокан на северо-востоке Байкальской рифтовой системы (Рассказов, Чувашова, 2018). Используются изотопные данные из обзора (Zhang et al., 2018) и из работ (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

**Fig 6.** Uranogenic Pb isotope ratio diagram ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ) of Late Cenozoic basalts of the CVF with trends and age estimates for magma sources.  $R^2$  are the correlation coefficients, NHRL is the Northern Hemisphere Reference Line, the line along which most of the compositions of the oceanic island basalts of the northern hemisphere are located (Hart, 1984), LOMU and ELMU are the compositional fields of the Central Asian basaltic magma sources with low (low  $\mu$ ) and elevated (elevated  $\mu$ ) value  $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$  (Rasskazov et al., 2019). The dividing line 4.51 Ga between LOMU and ELMU indicates the oldest age of the Central Asian magma source obtained from basalts of the Udokan volcanic field in the northeast of the Baikal rift system (Rasskazov and Chuvashova, 2018). Data used are from the review (Zhang et al., 2018) and (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

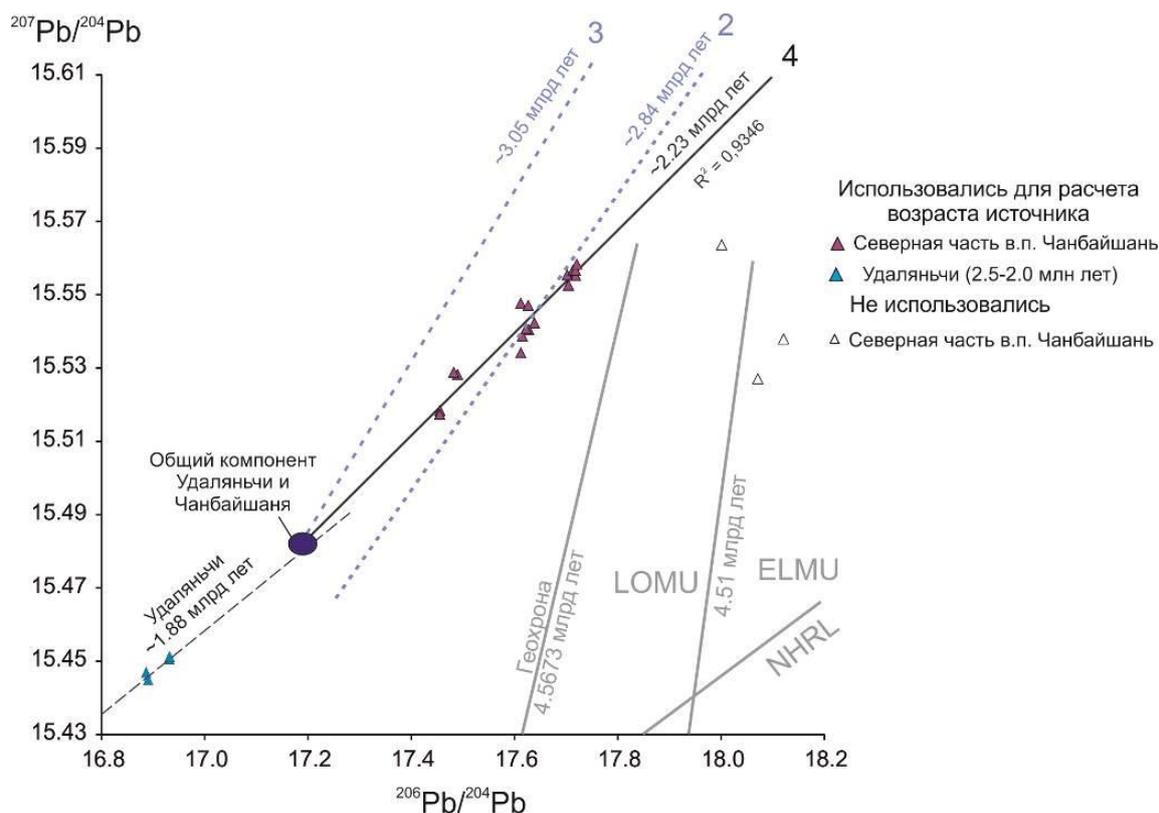
Тренды групп 1–3 (рис. 6) смещены относительно друг друга с повышением  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и относительным понижением  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . Линии 1 и 2 в основном образованы точками пород вулкана Тяньчи, распо-

ложенного в центре вулканического поля. Группа 3 представлена базальтами и андезит-базальтами восточной части вдоль берега р. Тумэнь (Tumen). Для групп 1–3 получены оценки возраста мантийных протолитов от

3.05 до 2.82 млрд лет. Наклон тренда наиболее молодых базальтов поля Чанбайшань возрастом 2.87–0.9 млн лет, в основном относящихся к постщитовой стадии, соответствует возрасту источника магм 2.72 млрд лет (Рассказов и др., 2019).

В группу 4 (рис. 7) входят породы северной и, в меньшей степени, северо-западной части вулканического поля, она в целом характеризуется наклоном линии, пересекающей линии групп 2 и 3 и соответствующей возрасту источника магм 2.23 млрд лет. Ранее была получена предварительная оценка

возраста этого источника магм 1.99 млрд лет (Рассказов и др., 2019) по породам преимущественно северной и центральной части вулканического поля без учета возраста. Тренды групп 3 и 4 сходятся в точке с наименее радиогенными изотопными соотношениями  $Pb^{206}Pb/^{204}Pb=17.26$  и  $^{207}Pb/^{204}Pb=15.51$ . Породы вулкана Вантяньэ и отдельная группа образцов пород повышенной щелочности с  $^{206}Pb/^{204}Pb>17.93$  не относятся к каким-либо трендам. Их фигуративные точки показаны на диаграммах, но не учитываются при расчете.



**Рис. 7.** Изотопные отношения ураногенного Pb ( $^{207}Pb/^{204}Pb - ^{206}Pb/^{204}Pb$ ) позднекайнозойских вулканических пород основного состава поля Чанбайшань и раннего этапа вулканизма поля Удаляньчи (вулкан Гелацюшань (Gelaqiushan), 2.5–2.0 млн лет назад) с трендами и оценками возрастов источников магм,  $R^2$  – коэффициент корреляции. Оценка возраста источника магм Удаляньчи по (Рассказов и др., 2019). Штриховыми синими линиями показаны тренды 2 и 3 для источников магм Чанбайшаня (рис. 6). Усл. обозн. см. рис. 6. Использованы изотопные данные из обзора (Zhang et al., 2018) и из работ (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

**Fig 7.** Uranogenic Pb isotope ratio diagram ( $^{207}Pb/^{204}Pb$  vs  $^{206}Pb/^{204}Pb$ ) of Late Cenozoic mafic volcanic rocks of the CVF and the early stage of volcanism of the Wudalianchi field (Gelaqiushan volcano, 2.5–2.0 Ma) with trends and age estimates for magma sources.  $R^2$  is the correlation coefficient. Estimation of the age of the Wudalianchi magma source is from (Rasskazov et al., 2019). Dashed blue lines show trends 2 and 3 for CVF magma sources (Fig. 6). Other designations are from the fig. 6. Data used are from the review (Zhang et al., 2018) and (Wee, 2002; Choi et al., 2020; Li et al., 2021).

Тренд группы 4 пород Чанбайшаня по наклону близок тренду пород ранней стадии вулканизма Удаляньчи, соответствующему возрасту источника магм 1.88 млрд лет. Тренды 3 и 4 источников базальтов щитовой стадии Чанбайшаня и тренд источников плейстоценовых пород Удаляньчи пересекаются на продолжении с примерным составом общего компонента  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.20$  и  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.48$  (рис. 7). Общий компонент Удаляньчи, выделенный в работе (Рассказов и др., 2019), имеет более радиогенный Pb. Тем не менее, так же, как и практически все базальты Чанбайшаня, вулканические породы Удаляньчи по изотопному составу Pb лежат в области LOMU выше линии NHRL, следовательно, они характеризуются сходными магматическими источниками.

### Обсуждение

#### *Близкие Pb–Pb оценки возраста магматических источников кайнозойских базальтов Южной и Центральной Азии*

Источники магм базальтов Чанбайшаня относятся к типу LOMU (с низким значением  $\mu$ ). Такой тип распространен по всей Центральной Азии. Позднеархейские и раннепротерозойские Pb–Pb оценки возраста магматических источников, сходные с интервалами возраста источников базальтовых магм Чанбайшаня, рассчитываются для многих пород Азии. К примеру, по оценкам с помощью Pb–Pb изохронного метода, возраста источников магм в интервале 3.0–2.7 млрд лет отмечены для неизмененных кайнозойских высокомагнезиальных пород Южного Тибета (~2.81 млрд лет), базальтов центральной части Декана (рифт Тапи, ~2.76 млрд лет), некоторых проявлений базальтов Южной Кореи (Ченгок,  $2.85 \pm 0.09$  млрд лет), п-ова Шаньдун (Shandong) Восточного Китая (миоценовые вулканические породы Линдзю (Linjiu), ~2.57 млрд лет). Возраста интервала 2.2–1.9 млрд лет менее распространены. Кроме плейстоценовых пород вулканического поля Удаляньчи Северо-Восточного Китая ( $1.88 \pm 0.06$  млрд лет), они характеризуют толеитовые базальты рифта Кутч западной Индии (~2.12 млрд лет) и Ханнуобы (~1.81 млрд лет). Базальты рифтов Тапи и Кутч отличаются сравнительно

высокими значениями  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18$  и относятся к типу ELMU (elevated  $\mu$ ) и, частично, к HIMU (high  $\mu$ ), а вулканические породы Южного Тибета и Линдзю – к типам ELMU и LOMU. Источники вулканических пород основного состава Удаляньчи, Ханнуобы и Ченгока относятся к типу LOMU (Рассказов и др., 2019; Rasskazov et al., 2020).

Оценка раннепротерозойского возраста источника вулканических пород Чанбайшаня 2.23 млрд лет (группа 4) совпадает с оценкой начала возрастного интервала проявления компонента субдуцированных силикатных отложений с низким  $\mu$  по (Choi et al., 2020) (~2.2 млрд лет) и с наиболее древней оценкой возраста ксенолитов из базальтов этой территории по данным Lu–Hf метода (Park et al., 2017) (2.28 млрд лет). Тренды трех других групп указывают на более древние, позднеархейские возраста источников.

#### *Сопоставления с датировками ксенолитов*

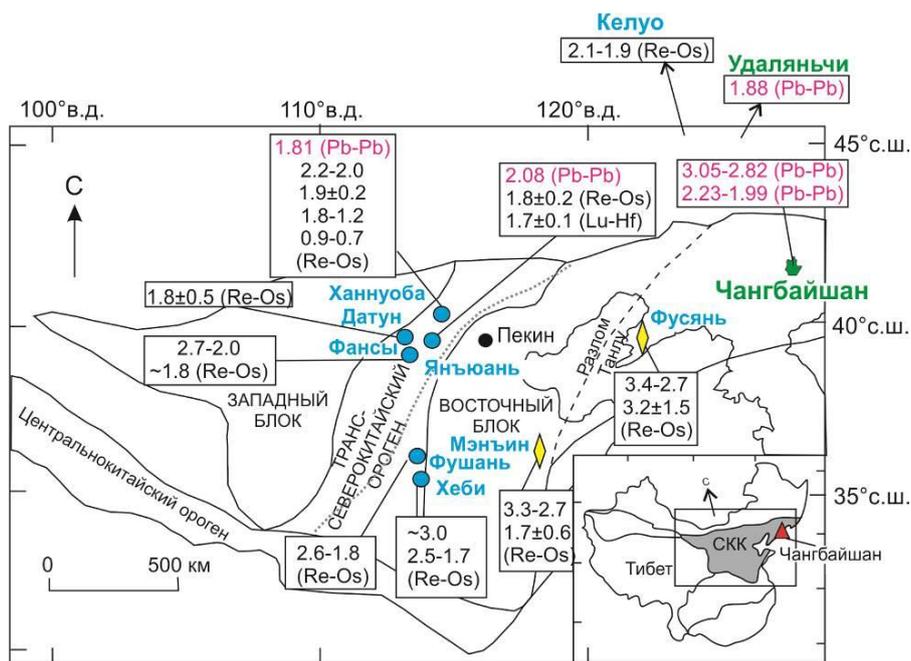
U–Pb датировки нижней коры Северо-Китайского кратона по цирконам из гранулитовых ксенолитов охватывают широкий диапазон от 3.2 млрд лет в юго-восточной его части и 2.8–2.5 млрд лет в северо-восточной до 120 и 47 млн лет в северной и северо-восточной частях кратона по цирконам из ксенолитов Пинцюаня (Pingquan), Фусяня (Fuxian) и Ханнуобы. Два последних проявления в целом характеризуются уменьшением возрастов нижнекоровых ксенолитов по направлению сверху вниз (Zheng, 2021). Исследованные ксенолиты нижних частей нижней коры Северо-Восточного Китая отличаются широким разнообразием составов, варьирующих от мафических гранулитов до пироксенитов и безгранатовых лерцолитов, что указывает на сложное, переходное строение нижней коры и, вероятно, различное происхождение (Рассказов и др., 2022; O'Reilly, Griffin, 2013; Zheng, 2021). Скорее всего, ввиду сложности строения и большого разнообразия U–Pb возрастных интервалов по цирконам ксенолитов, нижнекоровый компонент не участвовал в генезисе источников магм вулканического поля Чанбайшаня, имеющим отношение к трендам с определенным возрастом.

Для подтверждения данных о мантийных источниках, полученных Pb–Pb методом,

было проведено сопоставление с оценками возраста перидотитовых ксенолитов, полученными Re–Os и Lu–Hf изотопными методами, поскольку они также дают информацию о возрасте мантии и о времени её преобразования. Re–Os модельный возраст перидотитовых ксенолитов  $T_{RD}$  обозначает эпизод их обеднения рением посредством отделения расплава, и, следовательно, формирование мантийного литосферного материала реститового происхождения. При этом предполагается, что  $Re/Os \sim 0$ . Поскольку в условиях литосферной мантии Re обычно относится к средне-совместимым элементам, это условие будет выполняться при средних и высоких степенях частичного плавления. В отличие от  $T_{RD}$ , Re–Os возраст по модели  $T_{MA}$  рассчитывается с учетом значения  $^{187}Re/^{188}Os$  в образце. Существенное влияние может оказывать выбор используемых реперных значений  $^{187}Os/^{188}Os$  и  $^{187}Re/^{188}Os$  для

BSE (Bulk Silicate Earth) при расчете модельного возраста, кроме того, если  $^{187}Re/^{188}Os$  заметно отличается от нуля,  $T_{MA}$  будет больше  $T_{RD}$  (Carlson, 2005). Отметим, что микроэлементный состав перидотитовых ксенолитов из кимберлитов обычно отличается от микроэлементного состава источников базальтовых магм (Pearson, Nowell, 2002), следовательно, и возраст таких ксенолитов не обязательно будет соответствовать возрасту магматических источников.

В восточной части Северо-Китайского кратона, на краю которой расположено вулканическое поле Чанбайшань, основная часть перидотитовых ксенолитов из палеозойских кимберлитов показали позднерехейские модельные Re–Os возраста в интервалах 3.2–2.5 млрд лет ( $T_{RD}$ ) и 3.4–2.9 млрд лет ( $T_{MA}$ ) (Gao et al., 2002; Zhang et al., 2008) (рис. 8, подробнее см. табл. 1).



**Рис. 8.** Pb–Pb оценки возраста мантийных источников кайнозойских вулканических пород основного состава (Чанбайшань, Ханнуоба, Удаляньчи) и перидотитовых ксенолитов из базальтов (Яньюань) в сопоставлении с Lu–Hf и Re–Os данными по перидотитовым ксенолитам из палеозойских кимберлитов (желтые ромбы), мезозойских и кайнозойских базальтов (синие кружки). Границы Северо-Китайского кратона (СКК) и его блоков из работы (Liu et al., 2012). Использованы возрастные интервалы на основе Re–Os модельных датировок, Re–Os, Lu–Hf изохрон и эрохрон из работ (Gao et al., 2002; Zheng et al., 2007; Xu et al., 2008; Zhang H. et al., 2008; Zhang Y. et al., 2008; Liu et al., 2012).

**Fig. 8.** Pb–Pb age estimates for mantle sources of Cenozoic mafic volcanic rocks (Changbaishan, Hannuoba, Wudalianchi) and peridotite xenoliths from basalts (Yangyuan) compared with Lu–Hf and Re–Os data on peridotite xenoliths from Paleozoic kimberlites (yellow diamonds), Mesozoic and Cenozoic basalts (blue circles). Boundaries of the North China craton (CKK) and its blocks are from (Liu et al., 2012). Age intervals

based on Re–Os model dates, Re–Os, Lu–Hf isochrones and errochrones are from (Gao et al., 2002; Zheng et al., 2007; Xu et al., 2008; Zhang H. et al., 2008; Zhang Y. et al., 2008; Liu et al., 2012).

Для перидотитовых ксенолитов Яньюаня (Yanguan) Re–Os модельная датировка ~1.8 млрд лет с учетом погрешности коррелирует с изохронной Lu–Hf датировкой  $1.66 \pm 0.1$  млрд лет по клинопироксену (Liu et al., 2012). Наша оценка Pb–Pb возраста ксенолитов по этим образцам дала ~2.08 млрд лет при коэффициенте корреляции  $R^2=0.793$ . Многочисленные модельные и изохронные (эррохронные) Re–Os датировки в интервале 2.2–1.8 млрд лет были получены ранее по ксенолитам Ханнуобы (Gao et al., 2002; Zheng et al., 2007; Xu et al., 2008) и Датуня (Liu et al., 2011) в северной части Транс-Китайского орогена – переходной зоны между западной и восточной частями Северо-Китайского кратона.

На севере Транс-Китайского орогена наиболее древний Re–Os модельный возраст литосферной мантии по ксенолитам из базальтов 2.2–1.8 млрд лет, южнее – 3.0–2.5 млрд лет, при этом группа перидотитов северной части имеет более обогащенные составы. В районе Фансы (Fanshi) ксенолиты попадают в обе группы. Южная группа проявлений ксенолитов смещена на восток относительно северной группы. На основе Re–Os модельных датировок (Liu et al., 2011), кора и мантия в южной части имеют сход-

ный возраст, а в северной части литосферная мантия моложе. Такое различие может свидетельствовать об извлечении или, наоборот, привносе материала в мантию на севере под влиянием перераспределения компонентов при коллизии.

По составу клинопироксенов из ксенолитов Яньюаня (Liu et al., 2012) предполагается эпизод, связанный с обогащением литосферной мантии силикатными расплавами. Версии о раннепротерозойском эпизоде обогащения мантийного источника на основе Pb–Pb и Re–Os, Lu–Hf датировок не противоречат друг другу, так как водно-силикатные расплавы, вызвавшие метасоматическое обогащение, могли иметь отношение к древней зоне (или зонам) субдукции и характеризоваться пониженными значениями  $\mu$  в результате добавления материала субдуцированных отложений.

По гарцбургитам из базальтов соседнего с Удаляньчи вулканического поля Келуо, Северо-Восточный Китай, получен интервал Re–Os модельных датировок 2.1–1.9 млрд лет ( $T_{RD}$ ) (Zhang Y. et al., 2011), в который попадает и Pb–Pb датировка источника плейстоценовых магм Удаляньчи 1.88 млрд лет (Рассказов и др., 2019).

Т а б л и ц а 1

**Lu–Hf, Re–Os датировки и возрастные интервалы для перидотитовых ксенолитов из палеозойских кимберлитов, мезозойских и кайнозойских базальтов Восточного и Северо-Восточного Китая. Жирным шрифтом выделены значения и интервалы, совпадающие с Pb–Pb оценками возраста мантийных источников позднекайнозойских вулканических пород Чанбайшаня и Удаляньчи**

Table 1

**Lu–Hf, Re–Os ages and age intervals for peridotite xenoliths from Paleozoic kimberlites, Mesozoic and Cenozoic basalts of East and Northeast China. Values and intervals in bold type are closed to Pb–Pb age estimates for mantle sources of the Late Cenozoic volcanic rocks of CVF and Wudalianchi**

Породы, минералы	Источник данных	Местоположение	Возраст (возрастной интервал), млрд лет	Метод
Ксенолиты из кимберлитов (гранатовые и шпинелевые перидотиты)	Zhang H. et al., 2008	Фусянь (Fuxian)	3.4– <b>2.9</b> <b>3.2–2.7</b> <b>3.12±1.50</b>	$T_{MA}$ $T_{RD}$ Re–Os изохронный
		Мэнъин (Mengyin)	3.3– <b>3.0</b> ~2.7 1.66±0.64	$T_{MA}$ $T_{RD}$ Re–Os изохронный

Ксенолиты из кимберлитов (гранатовые перидотиты)	Gao S. et al., 2002	Фусянь	<b>3.3–2.9</b> 2.8–2.5	T <sub>MA</sub> T <sub>RD</sub>
		Мэнъян	~1.5 (?)	T <sub>RD</sub>
Ксенолиты из базальтов (шпинелевые лерцолиты и гарцбургиты)	Liu J. et al., 2011	Хеби (Hebi)	2.3–1.8 <b>2.1–1.7</b>	T <sub>MA</sub> T <sub>RD</sub>
		Фушань (Fushan)	2.6–2.1 2.5–1.8	T <sub>MA</sub> T <sub>RD</sub>
		Фансы (Fansi)	2.7–2.2 2.5– <b>2.0</b> ~1.8	T <sub>MA</sub> T <sub>RD</sub> T <sub>RD</sub>
		Датун (Datong)	1.80±0.56	Re–Os изохронный
		Яньюань (Yangyuan)	1.8±0.2	Re–Os изохронный
Ксенолиты из базальтов (перидотиты)	Gao S. et al., 2002	Ханнуоба	<b>2.0–0.7</b> 1.8–0.2 <b>1.91±0.22</b>	T <sub>MA</sub> T <sub>RD</sub> Re–Os изохронный
Сульфиды из шпинелевых лерцолитов и гарцбургитов	Zheng J. et al., 2007	Хеби	3.0±0.1 2.5±0.1	T <sub>RD</sub> , T <sub>MA</sub>
		Ханнуоба	<b>2.2±0.6</b> 1.4±0.2 0.9–0.7	T <sub>RD</sub> , T <sub>MA</sub> T <sub>RD</sub>
Сульфиды из шпинелевых лерцолитов	Xu X. et al., 2008	Ханнуоба	1.8–1.2 <1	T <sub>RD</sub>
Клинопироксены из перидотитовых ксенолитов	Liu J. et al., 2012	Яньюань	1.66±0.1	Lu–Hf изохронный
Ксенолиты из базальтов (гарцбургиты)	Zhang Y. et al., 2011	Келуо	<b>2.1–1.9</b>	T <sub>RD</sub>

Таким образом, полученные нами Pb–Pb оценки возраста мантийных магматических источников для вулканических полей Чанбайшань и Удаляньчи частично совпадают с Re–Os модельными и изохронными датировками перидотитовых ксенолитов из кимберлитов и базальтов Восточного и Северо-Восточного Китая. Первый, позднеархейский возрастной интервал для мантийных источников Чанбайшаня 3.05–2.82 млрд лет имеет хорошее совпадение с Re–Os модельными и изохронной (эррохронной, 3.12±1.50 млрд лет, (Zhang H. et al., 2008)) датировками по ксенолитам из кимберлитов Фусяня, находящегося в восточной части Северо-Китайского кратона к юго-востоку от Чанбайшаня (рис. 8, табл. 1). Раннепалеозойские возрасты источников 2.23 и 1.99 млрд лет с учетом погрешностей совпадают с Re–Os модельными датировками по ксенолитам и сульфидам из них и Re–Os изохронной датировкой ксенолитов (1.91±0.22 млрд лет (Gao S. et al., 2002)) из кайнозойских базальтов Хеби, Фушаня, Фансы и Ханнуобы. Все четыре перечисленных проявления вулканизма находятся в переходной зоне на тер-

ритории Транс-Северокитайского орогена к западу от Чанбайшаня. При этом возрастные совпадения определяются как для северной, так и для южной группы ксенолитов (Liu et al., 2011). Кроме того, второй возрастной интервал 2.2–2.0 млрд лет по изотопам Pb для источников магм Чанбайшаня близок к интервалу Re–Os модельных датировок 2.1–1.9 млрд лет (T<sub>RD</sub>) для гарцбургитовых ксенолитов из базальтов вулканического поля Келуо в Северо-Восточном Китае, расположенного рядом с полем Удаляньчи на территории вне кратона. Pb–Pb оценка возраста источника плейстоценовых вулканических пород Удаляньчи 1.88 млрд лет соответствует нижней границе этого интервала. Совпадения данных предполагают, что Pb–Pb метод оценки возраста источников магм, по крайней мере, для Восточного и Северо-Восточного Китая, коррелирует с Re–Os модельными и изохронными возрастными мантийных ксенолитов и что сочетание этих методов дает корректную оценку возраста мантийных протолитов.

Первый возрастной интервал 3.05–2.82 млрд лет сопоставляется с оценками возраста протолитов источников базальтов Чанбайшаня, представляющих литосферную мантию, общую с восточной частью Северо-Китайского кратона. Второй возрастной интервал 2.23–1.99 млрд лет характеризует преобразованный мантийный источник с добавлением материала древних субдуцированных отложений. В работе (Choi et al., 2020) такой процесс определяется только для мантии под вулканическим полем Чанбайшань. По распространенности Re–Os датировок ксенолитов этого интервала можно предположить, что протолиты этого типа распространены под другими вулканическими полями Восточного и Северо-Восточного Китая – Келуо, Ханнуоба, Хеби, Фансы и др.

### Заключение

Оценки возраста источников базальтовых магм вулканического поля Чанбайшань по изотопам ураногенного свинца (Pb–Pb изохронный метод) выполнены на основе опубликованных данных по ~250 образцам. В результате получено четыре значения возраста протолитов в источниках. Три из них – по трендам вулканических пород основного состава центральной части поля (вулкан Тяньчи, 2.84 и 2.82 млрд лет), и восточной части (берега р. Тумэнь, 3.05 млрд лет), смещенным относительно друг друга с повышением  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  и относительным понижением  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . Четвертое значение возраста 2.23 млрд лет получено по тренду группы пород северной и северо-западной частей вулканического поля. С учетом сделанных ранее возрастных оценок (Рассказов и др., 2019) для источников магм основного состава вулканического поля Чанбайшаня выделяется два возрастных интервала: 3.05–2.82 и 2.23–1.99 млрд лет. Породы вулкана Вантяньэ и группа пород повышенной щелочности с  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 17.93$  в расчеты не включались. Все источники относятся к типу LOMU, распространенному в Восточной и Центральной Азии. Точки пород попадают в область аномалии DUPAL.

Полученные возрастные интервалы близки к данным по возрастам перидотитовых ксенолитов из кимберлитов и базальтов, полученным Re–Os и Lu–Hf методами, и отли-

чаются от U–Pb результатов по гранулитовым ксенолитам. Сопоставления проводились для проявлений на территории Северо-Китайского кратона и к северу от него. Первый возрастной интервал 3.05–2.82 млрд лет сопоставляется с литосферной мантией, общей с восточной частью Северо-Китайского кратона. Второй возрастной интервал 2.23–1.99 млрд лет характеризует литосферный мантийный источник преобразованный с добавлением материала древних субдуцированных отложений.

### Литература

Андреева О.А., Ярмолук В.В., Андреева И.А., Джи Дж.Ч., Ли В.Р. Состав и источники магм вулкана Чанбайшань Тяньчи (Китай-Северная Корея) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456, № 2. С. 200–206. doi:10.7868/S0869565214140151

Горохов И.М., Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Васильева И.М., Ризванова Н.Г., Липенков Г.В., Дубинина Е.О. Раннерифейская билляхская серия Анабарского поднятия, Северная Сибирь: изотопная С–О геохимия и Pb–Pb возраст доломитов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2019. Т. 27, № 5. С. 19–35. doi:10.31857/S0869-592X27519-35

Рассказов С.В., Аило Ю., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А. Соотношения петрологического коро-мантийного перехода и сейсмического раздела Мохо под гранулитовыми террейнами: признаки преобразований корневой части Восточно-Тункинского блока в глубинных нодулях из позднекайнозойских вулканических пород // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 2, № 2. С. 91–127. doi:10.26516/2541-9641.2022.2.91

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и трансенсия на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2018. 384 с.

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Сунь Йи-минь, Саранина Е.В. Генеральная Pb-изотопная систематика источников вулканических пород новейшего геодинамического этапа Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10, № 2. С. 507–539. doi:10.5800/GT-2019-10-2-0424

### References

Basu A.R., Junwen W., Wankang H., Guanghong X., Tatsumoto M. Major element, REE,

and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: Implications for their origin from

suboceanic-type mantle reservoir // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1991. V. 105. P. 149–169.

Carlson R.W. Application of the Pt–Re–Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology // *Lithos.* 2005. V. 82. P. 249–272. doi:10.1016/j.lithos.2004.08.003

Choi H.-O., Choi S.H., Lee Y.S., Ryu J.-S., Lee D.-C., Lee S.G., Sohn Y.K., Liu J. Petrogenesis and mantle source characteristics of the late Cenozoic Baekdusan (Changbaishan) basalts, North China Craton // *Gondwana Research.* 2020. V. 78. P. 156–171. doi:10.1016/j.gr.2019.08.004

Duan Y., Zhao D., Zhang X., Xia S., Liu Z., Wang F., Li L. Seismic structure and origin of active intraplate volcanoes in Northeast Asia // *Tectonophysics.* 2009. V. 470. P. 257–276. doi:10.1016/j.tecto.2009.01.004

Fölling P.G., Zartman R.E., Frimmel H.E. A novel approach to double-spike Pb–Pb dating of carbonate rocks: examples from Neoproterozoic sequences in southern Africa // *Chemical Geology.* 2000. V. 171. P. 97–122.

Gao S., Rudnick R.L., Carlson R.W., McDonough W.F., Liu Y.-S. Re–Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 198. P. 307–322.

Gudmundsson O., Sambridge M. A regionalized upper mantle (RUM) seismic model // *Journal of Geophysical Research.* 1998. V. 103 (B4). P. 7121–7136. doi:10.1029/97jb02488

Hart S.R. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle // *Nature.* 1984. V. 309. P. 753–757.

Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // *Journal of Geophysical Research.* 2006. V. 111. B09305. doi:10.1029/2005JB004066

Hurst R.W. Lead isotopes as age-sensitive, genetic markers in hydrocarbons: 2. Kerogens, crude oils, and unleaded gasoline // *Environmental Geosciences.* 2002. V. 9(1). P. 1–7.

Kuritani T., Kimura J.-I., Miyamoto T., Wei H., Shimano T., Maeno F., Jin X., Taniguchi H. Intraplate magmatism related to deceleration of upwelling asthenospheric mantle: Implications from the Changbaishan shield basalts, northeast China //

*Lithos.* 2009. V. 112. P. 247–258. doi:10.1016/j.lithos.2009.02.007

Kuritani T., Xia Q.-K., Kimura J.-I., Liu J., Shimizu K., Ushikubo T., Zhao D., Nakagawa M., Yoshimura S. Buoyant hydrous mantle plume from the mantle transition zone // *Scientific Reports.* 2019. 9:6549. doi:10.1038/s41598-019-43103-y

Le Bas M.J., Streckeisen A.L. The IUGS systematics of igneous rocks // *J. Geol. Soc. London.* 1991. V. 148. P. 825–833.

Li M.-M., Xu Z.-T., Ventura G., Pan X.-D., Han D., Gu G.-H., Yan D.-H., Pan B., Feng J.-Q. Geochronology and petrogenesis of Early Pleistocene dikes in the Changbai Mountain Volcanic Field (NE China) based on geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic compositions // *Frontiers in Earth Science.* 2021. V. 9:729905. doi:10.3389/feart.2021.729905

Liu J., Carlson R.W., Rudnick R.L., Walker R.J., Gao S., Wu F.-y. Comparative Sr–Nd–Hf–Os–Pb isotope systematics of xenolithic peridotites from Yangyuan, North China Craton: Additional evidence for a Paleoproterozoic age // *Chemical Geology.* 2012. V. 332–333. P. 1–14. doi:10.1016/j.chemgeo.2012.09.013

Liu J.-q., Chen S.-s., Guo Z.-f., Guo W.-f., He H.-y., You H.-t., Kim H.-m., Sung G.-h., Kim H. Geological background and geodynamic mechanism of Mt. Changbai volcanoes on the China–Korea border // *Lithos.* 2015. V. 236–237. P. 46–73. doi:10.1016/j.lithos.2015.08.011

Liu J., Rudnick R.L., Walker R.J., Gao S., Wu F.-y., Piccoli P.M., Yuan H., Xu W.-l., Xu Yi.-G. Mapping lithospheric boundaries using Os isotopes of mantle xenoliths: An example from the North China Craton // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2011. V. 75. P. 3881–3902. doi:10.1016/j.gca.2011.04.018

Liu R., Fan Q., Zheng X., Zhang M., Liu N. The magma evolution of Tianchi volcano, Changbaishan // *Science in China. Series D.* 1998. V. 41(4) P. 382–389.

Liu X., Zhao D., Li S., Wei W. Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 464. P. 166–174. doi:10.1016/j.epsl.2017.02.024

O'Reilly S.Y., Griffin W.L. Moho vs crust–mantle boundary: Evolution of an idea // *Tectonophysics.* 2013. V. 609. P. 535–546. doi:10.1016/j.tecto.2012.12.031

- Park K., Choi S.H., Cho M., Lee D.-C. Evolution of the lithospheric mantle beneath Mt. Baekdu (Changbaishan): Constraints from geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic studies on peridotite xenoliths in trachybasalt // *Lithos*. 2017. V. 286–287. P. 330–344. doi:10.1016/j.lithos.2017.06.011
- Patterson C.C. Age of meteorites and the Earth // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1956. V. 10. P. 230–237.
- Pearson D.G., Nowell G.M. The continental lithospheric mantle: characteristics and significance as a mantle reservoir // *Philosophical Transaction of the Royal Society A*. 2002. V. 360. P. 2383–2410. doi:10.1098/rsta.2002.1074
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnygina T.A., Saranina E.V. Mantle evolution of Asia inferred from Pb isotopic signatures of sources for late Phanerozoic volcanic rocks // *Minerals*. 2020. V. 10 (9). 739. doi:10.3390/min10090739
- Rud'ko S.V., Kuznetsov A.B., Petrov P.Yu., Sitkina D.R., Kaurova O.K. Pb–Pb dating of the Dal'naya Taiga Group in the Ura uplift of southern Siberia: Implications for correlation of C-isotopic and biotic events in the Ediacaran // *Precambrian Research*. 2021. V. 362. 1062852001. doi:10.1016/j.precamres.2021.106285
- Tatsumoto M., Nakamura Y. DUPAL anomaly in the Sea of Japan: Pb, Nd, and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. V. 55. P. 3697–3708.
- Xu Q., Liu J., He H., Zhang Y. Nature and evolution of the lithospheric mantle revealed by water contents and He–Ar isotopes of peridotite xenoliths from Changbaishan and Longgang basalts in Northeast China // *Science Bulletin*. 2019. V. 64. P. 1325–1335. doi:10.1016/j.scib.2019.07.006
- Xu X., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., Geng H., Zheng J. Re–Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from eastern China: Progressive modification of lithospheric mantle // *Lithos*. 2008. V. 102. P. 43–64. doi:10.1016/j.lithos.2007.06.010
- Wee S.M. Geochemistry and isotopic systematics of Cenozoic alkaline volcanic rocks in Korea and NE China // *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen* 2002. V. 177(3). P. 213–240.
- Zhang H.-F., Goldstein S.L., Zhou X.-H., Sun M., Zheng J.-P. Evolution of subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China: Re–Os isotopic evidence from mantle xenoliths in Paleozoic kimberlites and Mesozoic basalts // *Contrib. Miner. Petrol.* 2008. V. 155. P. 271–293. doi:10.1007/s00410-007-0241-5
- Zhang M., Guo Z., Liu J., Liu G., Zhang L., Lei M., Zhao W., Ma L., Sepe V., Ventura G. The intraplate Changbaishan volcanic field (China/North Korea): A review of eruptive history, magma genesis, geodynamic significance, recent dynamic and potential hazards // *Earth-Sci. Rev.* 2018. V. 187. P. 19–52. doi:10.1016/j.earscirev.2018.07.011
- Zhang Y.-L., Liu C.-Z., Ge W.-C., Wu F.-Y., Chu Z.-Y. Ancient sub-continental lithospheric mantle (SCLM) beneath the eastern part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB): Implications for crust–mantle decoupling // *Lithos*. 2011. V. 126. P. 233–247. doi:10.1016/j.lithos.2011.07.022
- Zheng J. Thermal structure and lithosphere thickness in Eurasia // *Deep* 2021. Nanjing, China.
- Zheng J.P., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Yu C.M., Zhang H.F., Pearson N., Zhang M. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. V. 71. P. 5203–5225. doi: 10.1016/j.gca.2007.07.028
- Zhu B.-Q., Zhang J.-L., Tu X.-L., Chang X.-Y., Fan C.-Y., Liu Y., Liu J.-Y. Pb, Sr, and Nd isotopic features in organic matter from China and their implications for petroleum generation and migration // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65(15). P. 2555–2570.

**Ясныгина Татьяна Александровна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
старший научный сотрудник,  
тел.: (3952) 51–16–59,  
email: ty@crust.irk.ru

**Yasnygina Tatyana Alexandrovna,**  
candidate of geological and mineralogical sciences,  
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,

*Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
Senior Researcher,  
tel.: (3952) 51–16–59,  
email: ty@crust.irk.ru.*

***Рассказов Сергей Васильевич,***

*доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. лабораторией, зав. кафедрой,  
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет, геологический факультет,  
email: rassk@crust.irk.ru.*

***Rasskazov Sergei Vasilyevich,***

*Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Laboratory, Head of Chair,  
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,  
Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
email: rassk@crust.irk.ru.*

---