



УДК 553/41+553. 42:553. 3/9(571.53/. 55)

Рудные свинцы Гарганского блока и южного края Сибирского кратона: параметры сопряженной модели Холмса–Хаутерманса и конкордии–дискордии

С. В. Рассказов (rassk@crust.irk.ru)

С. Б. Брандт (bra@crust.irk.ru)

Аннотация. Найдена связь между моделями Холмса–Хаутерманса и конкордии–дискордии с определением при фиксированном μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) моментов замыкания U–Pb-изотопной системы (T) и отторжения свинцов (t). В рамках модели установлено отделение свинцов В-типа Гарганского блока во временном интервале 2,3–1,4 млрд лет назад из протолита ($\mu = 11,0$), консолидированного 4,31 млрд лет назад, а свинцов J-типа южного края Сибирского кратона – 1,80–0,25 млрд лет назад из протолита ($\mu = 20,1$), консолидированного 3,82 млрд лет назад. Протолиты образовались соответственно после начальной аккреции Земли и после эпизода ее поздней (около 3,9 млрд лет назад) тяжелой бомбардировки космическими телами.

Ключевые слова: золоторудные месторождения, Азия, ранняя Земля, изотопы Pb.

Введение

Геологические соотношения между Гарганским кратонным блоком Восточного Саяна и Сибирским кратоном являются предметом дискуссии. Предполагалось, что рифейская амальгамация Гарганского блока вместе с Сангиленским и Шутхулайским блоками привела к образованию Тувино-Монгольского массива как автономной структуры, не связанной с Сибирским континентом [2]. Согласно другой точке зрения [5, 6, 9], к Тувино-Монгольскому массиву относились блоки (террейны) хр. Хамар-Дабан и Китайских гольцов, а Гарганский, Сангиленский и Шутхулайский блоки рассматривались как тектонические отторженцы от Сибирского протоконтинента. Важным аргументом в пользу первой гипотезы явилась установленная пространственная смена изотопного состава свинца в позднекайнозойских щелочнобазальтовых лавах, излившихся на территориях Тувино-Монгольского массива и сопредельных каледонид. В пределах массива, от Окинской до Хамардабанской зон (включая Гарганский и Шутхулайский блоки), в лавах определены повышенные значения $\Delta^{208}/^{204}\text{Pb}$, характерные для обогащенной мантийной аномалии DUPAL южного полушария Земли, а в пределах Восточнотувинской и Джидинской зон каледонид аномалии не обнаружено [14]. С учетом реконструкций, выполненных по

палеомагнитным данным [5], сделан вывод о том, что аномалия DUPAL была привнесена в Азию литосферой Тувино-Монгольского массива – фрагмента Восточной Гондваны, дрейфовавшего в позднем докембрии через Палеоазиатский океан и причленившегося в середине кембрия к краю Сибирского континента.

Если Гарганский блок некогда представлял единое целое с фундаментом Сибирского кратона, то геологическое родство должно быть выражено в сходстве изотопно-геохимических параметров этих структур. Если же они имели разную геологическую предысторию, то различия между ними должны отразиться в ходе геохимической эволюции изотопных систем.

Важную изотопно-геохимическую информацию об источниках вещества несут в себе отторженные (рудные) свинцы. В природе встречаются свинцы нескольких типов: радиогенный свинец, соседствующий в породах непосредственно с материнскими ураном и торием, свинец акцессорных рудных минералов, не связанный непосредственно с ураном и торием, и, наконец, сегрегации свинца в рудных залежах, также не связанные непосредственно с ураном и торием.

В геологических процессах Pb ведет себя как чрезвычайно подвижный химический элемент. Он рассеян в породах и минералах, содержащих U и Th, а выделившись в рудную фазу (галенит, пирит, арсенипирит и др.), отторгается от материнских изотопов U и Th и сохраняет изотопные отношения момента отторжения. В общем случае модельный изотопный возраст отторженных свинцов должен соответствовать возрасту образования рудного вещества в других изотопных системах (например, Re–Os-возрасту молибденитов). Наиболее простое решение могло бы достигаться для свинцов, переходящих из рассеянного распределения в рудную фазу в результате единовременного события, ограниченного магматическими и гидротермальными процессами, непосредственно сформировавшими месторождение. Чаще всего возраст отторжения свинцов по той или иной модели не согласуется с возрастом синрудной минерализации. В этом случае неизбежно возникает вопрос: какие параметры модели нуждаются в уточнении для получения исчерпывающей картины изотопной эволюции свинцов?

Для отторженных свинцов строго обоснована модель Холмса–Хаутерманса. В моделях Стэйси–Крамерса и других [22] вводились дополнительные коэффициенты вне строгих ограничений эволюции Th, U–Pb-изотопной системы. Как правило, модели создавались для свинцов, не укладывающихся в рамки модели Холмса–Хаутерманса, с целью уменьшения разрыва между возрастной интерпретацией изотопных данных по свинцам и геологической информацией по конкретным территориям.

Для обоснования необходимых расчетных геохимических параметров в настоящей статье сначала решается задача объединения диаграмм Холмса–Хаутерманса и конкордии–дискордии, а затем модель применяется для интерпретации изотопного состава рудных свинцов из месторождений Гарганского блока и южного края Сибирского кратона.

Основные понятия и модели

Отношения $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$, $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$, $\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$ изменяются в природных рудных свинцах в значительных пределах. Варьирует содержание изотопов ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , которые радиогенны, т. е. являются продуктами радиоактивного распада урана и тория. Радиогенные свинцы, так или иначе, в своей геологической «биографии» были в контакте с ураном и торием. Лишь изредка встречаются образцы, характеризующиеся низкими изотопными отношениями. В качестве минимальных приняты отношения изотопов в метеорите Canyon Diablo:

$$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = 9,307, \quad \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = 10,294, \quad \frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} = 29,476.$$

Это – состав первородных свинцов, никогда не контактировавших с материнскими радиоактивными веществами. Значительная радиогенная добавка заставляет предположить, что свинцы некогда были в составе огромных материнско-дочерних систем, но при некоторых специфических обстоятельствах были от них отторгнуты.

Модель Холмса–Хаутерманса дает оценку времени отторжения рудных свинцов в первом приближении. Чем ближе к геохроно ($t = 0$) располагаются точки, тем моложе возраст. В сульфидных осадочных отложениях и вулканических породах зеленокаменных поясов и островных дуг выделена группа согласных свинцов (соответствующих возрасту вмещающих отложений), расположенных на единой кривой одностадийной модели со значением $\mu_1 = 9,0$. Свинцы, не лежащие на этой кривой, считаются аномальными. Часть свинцов, дающих возраст будущего (с повышением $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и смещением правее геохроны), относятся к типу J (Joplin), а другая часть свинцов, дающих возраст древнее возраста вмещающих пород, – к типу B (Bleiberg) [22, 24].

Модель конкордии–дискордии (согласия–несогласия) широко применяется при датировании горных пород в U–Pb-изотопной системе по акцессорным минералам (циркону, титаниту, апатиту и др.). В модели разомкнутой системы формально описывается процесс отторжения свинцов, поэтому для понимания изотопной истории рудных свинцов необходимо подробно рассмотреть свойства именно этой модели.

Все формулы радиоизотопной геологии выстраивают сложные экспоненциальные соотношения между материнскими и дочерними изотопами, продиктованные законом Резерфорда – Содди. Однако при измерении изотопных отношений типа $\frac{^i\text{Pb}}{^j\text{U}}$ оказалось, что фигуративные точки часто располагались вдоль прямых линий. Для объяснения этого явления Дж. Везериллом предложена модель конкордии – дискордии.

Конкордией (линией согласия) в координатах

$$x = \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}} = e^{\lambda_8 t} - 1; \quad y = \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{235}\text{U}} = e^{\lambda_5 t} - 1 \quad (1)$$

называется геометрическое место точек, для которых возрасты, определенные по отношениям $\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}}$ и $\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{235}\text{U}}$, равны между собой (где λ_8 и λ_5 – соответственно константы радиоактивного превращения ${}^{238}\text{U}$ и ${}^{235}\text{U}$). Это – кривая с параметром «возраст t ». Заметим, что изотопные отношения имеют размерность «частица на частицу», а следовательно, концентрации должны быть выражены в молях (микромольях) на грамм.

Первая производная (наклон) конкордии будет составлять

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = \frac{\lambda_5 e^{\lambda_5 t}}{\lambda_8 e^{\lambda_8 t}} = \frac{\lambda_5}{\lambda_8} e^{(\lambda_5 - \lambda_8)t}.$$

Крутизна кривой во времени растет. Начальный наклон отличен от нуля. Имеем

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{t=0} = \frac{\lambda_5}{\lambda_8} = \frac{9,8}{1,55} = 6,322.$$

Кривизна конкордии пропорциональна второй производной

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \left(\frac{\lambda_5}{\lambda_8}(\lambda_5 - \lambda_8)\right) e^{(\lambda_5 - \lambda_8)t} = \frac{\lambda_5}{\lambda_8}(\lambda_5 - \lambda_8) e^{(\lambda_5 - \lambda_8)t}.$$

Кривизна со временем увеличивается. Начальная кривизна отлична от нуля. Аппроксимировать конкордию прямой линией нельзя даже при малых возрастах.

Дискордией (линией несогласия) называется прямая, секущая конкордию в двух точках. Серии измеренных точек акцессорных минералов часто ложатся вдоль таких прямых. Дж. Везериллом было предложено объяснение их происхождения в результате *метаморфического удара*.

Диффузионные дискордии

Применение прямолинейных дискордий оправдано, если ясно прослеживается более молодой наложенный процесс (метаморфический удар). Но исследователи часто встречались со случаями, когда фигуративные точки приблизительно ложились на прямые, а наложенного процесса, соответствующего нижнему пересечению между конкордией и дискордией, в природе обнаруживать не удавалось. Только верхнее пересечение этих линий удавалось осмыслить геологически как время кристаллизации системы. Для описания такой ситуации была предложена диффузионная модель. Предполагалось, что радиогенный свинец U–Pb–

изотопной системы подвержен непрерывной диффузии, причем структура, из которой происходит диффузия, имеет доменное строение, характеризующееся разными диффузионными параметрами. Это вполне соответствует современным воззрениям на строение природных кристаллов. В системе одновременного радиоактивного накопления и диффузии дочерних веществ (в нашем случае свинцов) справедливы следующие выражения [16]:

$$\begin{aligned}
 x = \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{238}\text{U}} &= \frac{8}{\pi^2} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{(2\nu+1)^2} \frac{e^{(1-\pi^2(2\nu+1)^2 \frac{Fo}{\lambda_{.8} t_{\nu}}) \lambda_{.8} t} - 1}{1 - \frac{\pi^2(2\nu+1)^2 Fo}{\lambda_{.8} \cdot t}}, \\
 y = \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{235}\text{U}} &= \frac{8}{\pi^2} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{(2\nu+1)^2} \frac{e^{(1-\pi^2(2\nu+1)^2 \frac{Fo}{\lambda_{.5} t_{\nu}}) \lambda_{.5} t} - 1}{1 - \frac{\pi^2(2\nu+1)^2 Fo}{\lambda_{.5} \cdot t}}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $Fo = \frac{Dt}{h^2}$ (Fo – критерий Фурье, D – коэффициент диффузии, h – размер зерна минерала). Это – выражения бесконечных рядов. Кривизна дискордий мала. Они исходят из начала координат и на рисунках почти прямолинейны. Переменной является Fo , значениями которого при построении дискордии практически приходится варьировать от десятитысячных долей до 3.

Сильно радиогенные рудные свинцы, по-видимому, некогда входили в состав Th, U–Pb-изотопной системы и в какой-то момент времени были от нее отторгнуты. Такой момент отторжения формально описывается моделью конкордии–дискордии. Как правило, при помощи этой модели интерпретируются процессы в акцессорных минералах, чаще всего в цирконах. Речь идет об отторжении микроколичеств свинцов, которые должны образовывать микроколичества акцессорных свинец-содержащих минералов во вмещающих породах. Если говорить о рудных месторождениях свинца, то необходимо предположить действие механизма конкордии–дискордии в огромных масштабах.

Если в варианте дискордии Везерилла отторжение предполагалось мгновенным (дискретным) и под возрастом отторженных свинцов понимался момент отторжения, в варианте диффузионной дискордии Вассербурга предполагалось, что в системе уран – свинец происходило континуальное отторжение свинцов. В этом случае нельзя говорить о моменте отторжения. Отторженные свинцы, казалось бы, не должны иметь определенного возраста.

При наличии диффузии количество накопившихся в системе свинцов будет

$${}_{208,207,206}Pb = {}_{238,235,232}P \frac{8}{\pi^2} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{(2\nu+1)^2} e^{\frac{(1-\pi^2(2\nu+1)^2 \frac{F_0}{\lambda_{8,5,2} t^\nu}) \lambda_{8,5,2} t}{1 - \frac{\pi^2(2\nu+1)^2 F_0}{\lambda_{8,5,2} \cdot t}} - 1}, \quad (3)$$

где ${}_{238,235,232}P$ – материнские (parent) изотопы урана и тория, $\lambda_{8,5,2}$ – соответствующие константы радиоактивного распада. При $F_0 = 0$ выражение (3) превращается в обычную формулу накопления радиоактивных веществ:

$${}^j Pb = {}^i P (e^{\lambda t} - 1). \quad (4)$$

Выполненные расчеты [19] показали, что дискордии исходят из начала координат и пересекают конкордию в единственной точке, соответствующей $F_0 = 0$, и что необходима только одна измеренная точка, чтобы оценить всю диффузионную дискордию, а следовательно, и возраст события.

Модифицированная модель отторженных свинцов

Каковы бы ни были механизмы замещения узловых элементов кристаллической решетки, формально точки конкордии переходят в точки дискордии с однозначным взаимным соответствием [19].

Рассмотрим U–Pb-изотопную систему, в которой отторжение свинцов происходит в кристаллических породах мгновенно в разные моменты времени (модель Везерилла). Это обычный метод интерпретации отторженных свинцов. Кривой отторженных свинцов будет сама конкордия с несколько измененными осями координат. Вспомним, что координаты конкордии рассчитываются:

$$x = \frac{{}^{206}Pb}{{}^{238}U} = e^{\lambda_8 t} - 1; y = \frac{{}^{207}Pb}{{}^{235}U} = e^{\lambda_5 t} - 1.$$

На рис. 1 построена конкордия для возраста Земли – $4,56 \cdot 10^9$ лет при преобразовании координат с Pb–U в Pb–Pb:

$$x' = x \times \mu = x \times \frac{{}^{238}U}{{}^{204}Pb} = \frac{{}^{206}Pb}{{}^{204}Pb};$$

$$y' = y \times (\mu/137,8) = \frac{1}{{}^{137,8}} \frac{{}^{207}Pb}{{}^{204}Pb}. \quad (5)$$

Все точки свинцов, отторженных по конкордии, т. е. сегодня, лежат правее геохроны и являются аномальными. Если отторжение произошло не сегодня, а t лет назад, то из полного количества отторженных свинцов нужно вычесть то количество, которое образовалось бы за промежутки времени t . Получим выражения радиогенной добавки к изотопному составу для расчета возраста в модели Холмса–Хаутерманса:

$$x = \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \mu(e^{\lambda 8T} - e^{\lambda 8t}); \quad y = \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \frac{\mu}{137,8}(e^{\lambda 5T} - e^{\lambda 5t}). \quad (6)$$

Добавим нерадиоогенный свинец троилита из метеорита Canyon Diablo:

$$x = \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \mu(e^{\lambda 8T} - e^{\lambda 8t}) + 9,307, \\ y = \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \frac{\mu}{137,8}(e^{\lambda 5T} - e^{\lambda 5t}) + 10,294. \quad (7)$$

Согласно модели Холмса–Хаутерманса, накопление свинцов начинается с момента образования Земли (4,56 млрд лет назад) и заканчивается моментом их отторжения (*t*). Этот процесс представлен на рис. 1 верхней кривой. Все эти свинцы нормальные, т. е. находятся левее геохроны.

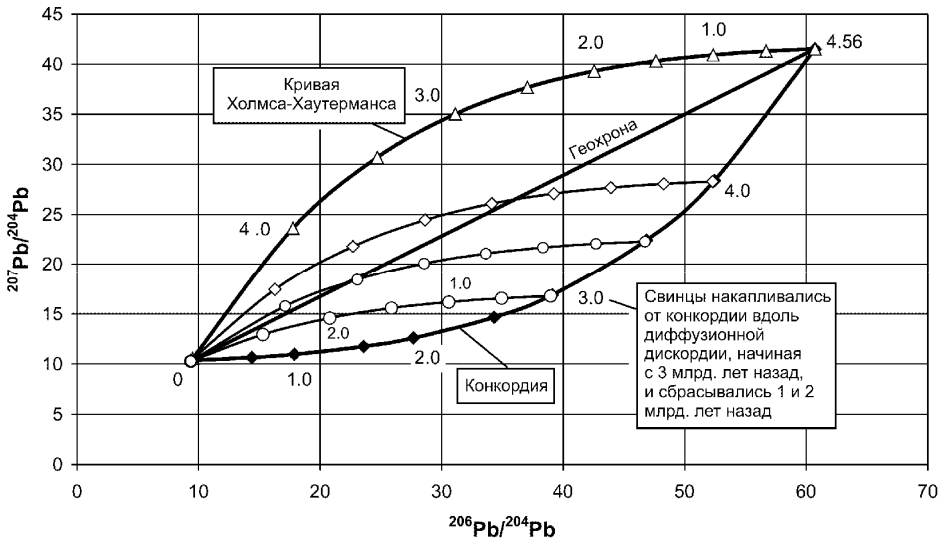


Рис. 1. Кривая накопления рудных свинцов Холмса–Хаутерманса (белые треугольники), совмещенная с кривыми эволюции разомкнутой U–Pb-изотопной системы: конкордии (черные ромбы) и диффузионной дискордии (белые кружки и ромбы).

Расчеты выполнены при $\mu = 50$. Цифрами указано время (млрд лет назад)

Но может ли накопление свинцов осуществляться по кривой Холмса–Хаутерманса от состава первородных свинцов? Гравитационная аккреция Земли сопровождалась выделением значительного количества тепла при отделении металлического ядра, бомбардировках космическими телами, радиоактивном распаде коротко- и долгоживущих нуклидов и т. д. В результате Земля плавилась. Особое событие в ранней истории Земли – ее коллизия с импактным телом Тея, имевшим размеры Марса, – повлекла за собой образование Луны из силикатной части последней. Изотопный состав

Pb валовой силикатной Земли смещен правее геохроны, что рассматривается как следствие непрерывного формирования ядра при экспоненциально уменьшающемся росте Земли за период с оценками в десятки миллионов лет (менее чем 40 млн лет). Такое же смещение изотопного состава Pb могло произойти и при коллизии двух планет – прото-Земля и Тея [16, 23].

Более того, образовавшийся на ранней Земле магматический океан мог существовать достаточно долго, а отсутствие кристаллических пород означало отсутствие и механизма диффузионного отделения свинцов. Нестабильность Земли поддерживалась метеоритными бомбардировками не только во время ее начальной аккреции, но и позже. В частности, предполагается интенсивная бомбардировка около 3,9 млрд лет назад [26].

Радиогенные рудные свинцы отторгались от силикатных пород Земли, поэтому их накопление не может математически связываться с геохроной в рамках одностадийной модели. Эта особенность отторженных свинцов требует корректировки модели Холмса–Хаутерманса. Интегрированный эффект всевозможных факторов выражается введением параметра T , характеризующего в сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордии переход от конкордии к дискордии на этапе ранней эволюции Земли.

Предположим, что U–Pb-изотопная система сбрасывала свинцы по дискордии начиная с 3 млрд лет назад. Все свинцы оказываются аномальными. Если же U–Pb-изотопная система начинала сброс свинцов 4 млрд лет назад, то при отторжении ~2 млрд лет назад и позже они будут аномальными, а свинцы более раннего отторжения – нормальными. Еще меньше нормальных свинцов образуется при гипотетическом замыкании системы 3,5 млрд лет назад.

Обратим внимание на факт, что аномальные свинцы, возникшие *сегодня*, останутся аномальными во все последующие геологические времена. Для обоснования этого утверждения рассмотрим геохроноу. Она является линией, соединяющей фигуративную точку первородного свинца с фигуративной точкой сегодняшнего момента (4,56 млрд лет). Покажем, что ее наклон во времени растет и стремится к ∞ . Для геохроны в системе координат изотопов свинца рассчитываются:

$$x = \mu(e^{\lambda_{8T}} - 1) + 9,307, y = \frac{\mu}{137,8}(e^{\lambda_{5T}} - 1) + 10,294. \quad (9)$$

Переменной является μ . Можно исключить μ из этих уравнений и получить уравнение геохроны в виде

$$\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} = \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \frac{e^{\lambda_{5T}} - 1}{137,8(e^{\lambda_{8T}} - 1)} - \frac{9,307}{137,8} \frac{(e^{\lambda_{5T}} - 1)}{(e^{\lambda_{8T}} - 1)} + 10,294. \quad (10)$$

Ее наклон $k = \frac{y}{x}$. – это возрастающая функция T . С ростом T наклон стремится к ∞ , поэтому свинцы, оказавшиеся правее геохроны сегодня, ос-

танутся правее всегда. В то же время свинцы, являющиеся нормальными сегодня, могут в геологическом будущем оказаться аномальными. Понятие «нормальные» и «аномальные» свинцы лишается своего первоначального геохимического смысла. Никакими особыми свойствами эти категории не обладают, хотя нормальные свинцы в общем должны быть производными протолита с большими значениями T , а аномальные J-типа – с меньшими.

На рис. 2 приведены кривые, рассчитанные при $\mu = 50, 40$ и 8 . С уменьшением значений μ кривые смещаются к началу координат. Варьируя параметрами T и μ и используя метод последовательных приближений, можно найти диффузионную дискордию, соответствующую линейному распределению природных свинцов. Такая модель отторженных свинцов количественно строго детерминирована.

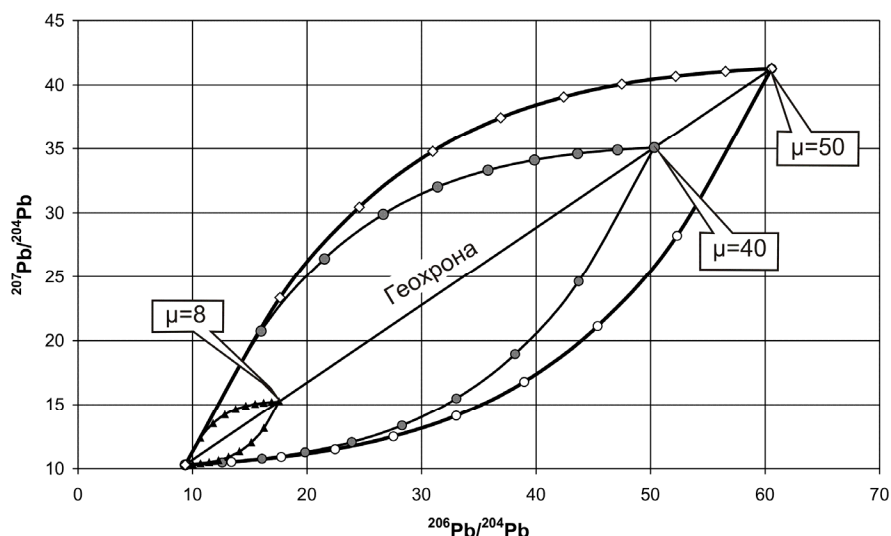


Рис. 2. Смещение вдоль геохроны кривых накопления рудных свинцов Холмса–Хаутерманса и современных свинцов конкордии разомкнутой U–Pb-изотопной системы в зависимости от значений μ

Параметры отторженных свинцов из месторождений

Предлагаемая нами модель применяется для расчета параметров рудных свинцов из месторождений Гарганского кратонного блока и южного края Сибирского кратона (рис. 3).

Строение месторождений и состав руд Гарганского блока, в том числе изотопные отношения рудных свинцов, охарактеризованы в серии работ [1, 8, 11, 19 и др.].

Л. А. Неймарком и др. [11] на основе сопоставления тренда точек измеренных образцов с кривой эволюции изотопного состава Pb ($\mu_2 = 10,55$) предполагалось, что в качестве источника свинцов служила кора возрастом $\sim 2,75$ млрд лет, а рудогенерирующий процесс протекал ~ 450 млн лет

назад. С начальным изотопным составом связывались граниты сумсунурского комплекса, а с конечным – граниты Мунку-Сардыкского массива.

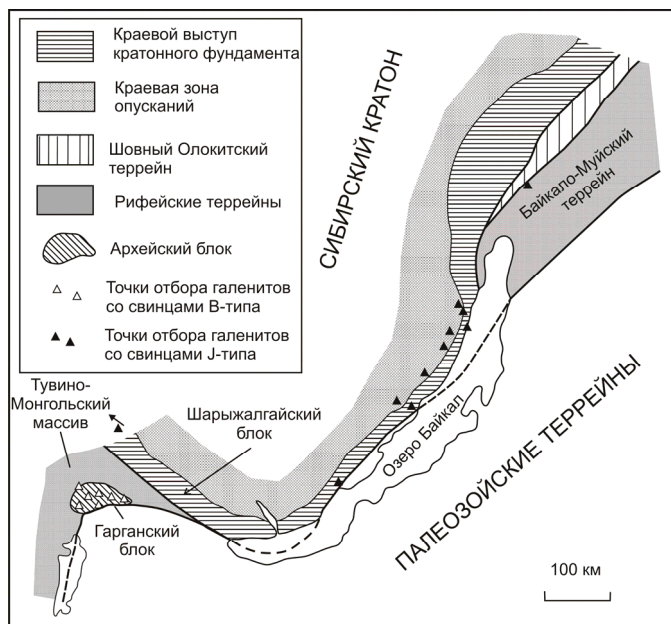


Рис. 3. Схема пространственных соотношений рифейских и палеозойских террейнов с южным краем Сибирского кратона.

Точка аномальных свинцов J-типа со стрелкой указывает местоположение Ингашинской трубки кимберлитоподобных пород за рамкой карты-схемы в юго-западной шовной зоне Сибирского кратона. Схема составлена на основе построений В. Г. Беличенко и др. [3] с изменениями и дополнениями

Авторами настоящей статьи свинцы интерпретировались с использованием параллелограмма Гейсса, основанного на модели Холмса–Хаутерманса (т. е. с расчетом от возраста аккреции Земли $T = 4,56$ млрд лет). Получен возраст первой стадии $t_1 = 1,8$ млрд лет, возраст второй стадии $t_2 \sim 0,5$ млрд лет, $\mu_1 = 8,02$, $\mu_2 = 9,12$ [19].

Выполненные в последние годы геохронометрические исследования магматических комплексов юго-восточной части Восточного Саяна показали интервал датировок от 1020 до 154 млн лет [7, 8, 13, 15, 25]. К примеру, для синрудных даек холбинского комплекса рассчитан Rb–Sr-изохронный возраст 452 ± 8 млн лет при $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0,7110 \pm 0,0014$. Между тем для гранитов сумсунурского комплекса определен возраст около 790 млн лет по результатам U–Pb и Rb–Sr датирования, а для мусковитизированных гранитоидов и мусковита Таинского месторождения – Rb–Sr-изохронный возраст 670 ± 19 млн лет. Золоторудные месторождения нередко находятся на контакте гранитоидов и офиолитов. Офиолиты обдуцированы на Гарганскую глыбу. Для них измерен возраст 1020 млн лет U–Pb методом по цирконам.

Используя диаграммы рис. 1 и 2, мы аппроксимируем фигуративные точки отторженных свинцов из месторождений Гарганского блока линией дискордии с параметрами $T = 4,31$ млрд лет и $\mu = 11$. Вдоль кривой накопления радиогенных свинцов точки перекрывают временной интервал 2,35–1,40 млрд лет (рис. 4).

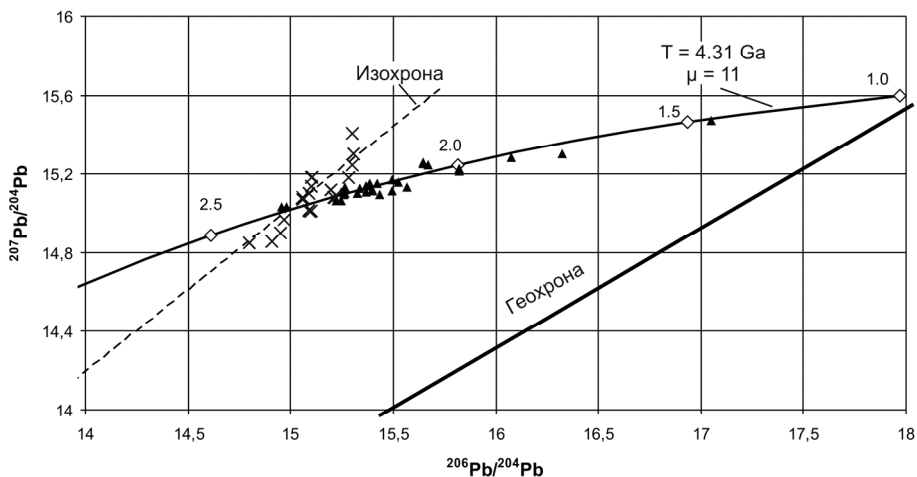


Рис. 4. Интерпретация отторженных свинцов из рудных месторождений Гарганской глыбы.

Точки галенитов разных месторождений (черные треугольники) аппроксимируются дискордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – кокордии–дискордии с параметрами $T = 4,31$ млрд лет и $\mu = 11$. Точки галенитов Водораздельного месторождения (косые крестики) распределяются вдоль изохроны (штриховая линия). Используются данные Л. А. Неймарка и др. [11], Е. В. Айриянца и др. [1] и новые неопубликованные результаты измерений авторов

Интервал сравнительно низких изотопных отношений ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 14,957–15,569), соответствующий временному интервалу отторжения 2,3–2,0 млрд лет назад, определен в галенитах из руд Холбинской зоны (месторождения Зун-Холба, Сумсунурское, рудопроявления оз. Сумсунурское, Тайсаевское, Верхнехарагольское). На северной и южной окраинах Холбинской зоны, в рудных жилах Динамитного и Кварцитового рудопроявлений, получен интервал более высоких изотопных отношений ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15,819–16,073), соответствующих временному интервалу отторжения 1,9–1,8 млрд лет назад. Это свидетельствует об относительном уменьшении времени сброса свинцов по латерали Холбинской зоны. В галенитах из рудных жил месторождений Оспа-Ильчирской рудной зоны (Зун-Оспинское и Таинское месторождения) измерены промежуточные изотопные отношения ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15,380–15,671), соответствующие временному интервалу 2,15–2,0 млрд лет назад, а в рудопроявлениях этой зоны (Геофизическом II и III) – наиболее высокие ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 16,326–17,050) с временным интервалом 1,75–1,40 млрд лет назад.

Для свинцов месторождения Водораздельное северного края Гарганского блока [1] получен широкий разброс фигуративных точек, выстраивающихся вдоль изохроны со значением времени отторжения 2,35–2,30 млрд лет назад – максимальным для Гарганского блока (рис. 4). Изохрона обозначает момент U–Pb дифференциации материала с исходным составом, соответствовавшим составу коры центральной части Гарганского блока.

Изотопные отношения свинцов в галенитах, отобранных в пределах края Сибирского кратона на Байкальском и Приморском хребтах северо-западного побережья оз. Байкал, определены С. Б. Брандтом и др. [4]. Галениты характеризуют рудные месторождения в метаморфических породах выступа фундамента и в породах осадочного чехла байкальского трехчленного комплекса. Линейное расположение точек интерпретировано в рамках двустадийной модели (с использованием параллелограмма Гейсса) параметрами $t_1 = 1,7$ млрд лет, $t_2 = 0,46$ млрд лет, $\mu_1 = 8,93$, $\mu_2 = 16-40$. Свинцы J-типа находятся правее геохроны.

Северо-восточнее, в палеопротерозойском Северо-Байкальском вулканоплутоническом поясе, исследовались свинцы галенитов из стратиформного Pb–Zn месторождения Таборное, рудопроявлений Озерное и руч. Прозрачный. В координатах изотопных отношений свинцов точки галенитов расположились на одной линии с остатками после кислотной обработки полевых шпатов из магматических пород и метасоматитов. Для интерпретации использована кривая Стэйси и Крамерса. Изохронная линия пересекает ее при значениях 0,39 и 1,82 млрд лет назад, а по двустадийной модели с заданным U–Pb временем кристаллизации магматических пород пояса 1,86 млрд лет назад (t_1) получена оценка времени наложенного процесса $t_2 = 0,32$ млрд лет назад [10]. Представленные Pb-изотопные данные интерпретировались как свидетельство высоких содержаний ураногенного и торогенного свинцов ($\mu = 11,8-13,0$, $\omega = 43,6-48,4$).

Измеренные изотопные отношения свинцов галенитов Северо-Байкальского пояса находятся в диапазоне отношений, определенных в галенитах фундамента и чехла южного края Сибирского кратона. Зона с аномальными свинцами J-типа прослеживается на побережье Среднего и Северного Байкала не менее чем на 300 км. Такой же аномальный изотопный состав свинцов измерен в галенитах из кимберлитоподобных пород Ингашинской трубки, расположенной в юго-западной шовной зоне Сибирского кратона (данные Н. Н. Фефелова и С. И. Костровицкого) (рис. 3).

По сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордии мы аппроксимируем ряд точек свинцов кривой при $T = 3,82$ млрд лет назад и $\mu = 20,1$ (рис. 5). Смещение точек правее геохроны обусловлено поздним замыканием U–Pb-изотопной системы. Свинцы отделились от кристаллических пород в интервалах 1,8–1,5, 1,2–0,9, 0,6–0,5 млрд лет назад и около 2,5 млрд лет назад.

Полученный временной интервал отторжения свинцов, в общем, согласуется с временным интервалом магматических и метаморфических

событий на южном краю кратона и сопредельных с ним рифейских и палеозойских террейнах. Наиболее ранняя фаза отторжения свинцов близка по времени гранитному магматизму, сопровождавшему общую сборку Сибирского кратона, а заключительная фаза совпадала с образованием низкотемпературных кальцитовых и кварц-карбонатных жил в слюдяном кристаллическом комплексе [4, 20, 22,17 и ссылки в этих работах].

Обсуждение результатов

Палеопротерозойский Северо-Байкальский вулканоплутонический пояс является частью рифейского Байкало-Муйского террейна [3] (рис. 3). Сквозное распространение аномальных свинцов на краю Сибирского кратона и в Байкало-Муйском террейне свидетельствует об общности источников рудного вещества этих структур. По крайней мере, часть Байкало-Муйского террейна представляет собой блок, генетически единый с сопредельным краем кратона, в отличие от рифейского Тувино-Монгольского массива, примкнувшего к Сибирскому кратону в результате крупномасштабных тектонических перемещений. Этим объясняется изотопно-геохимическая специфика рудных свинцов Гарганского блока.

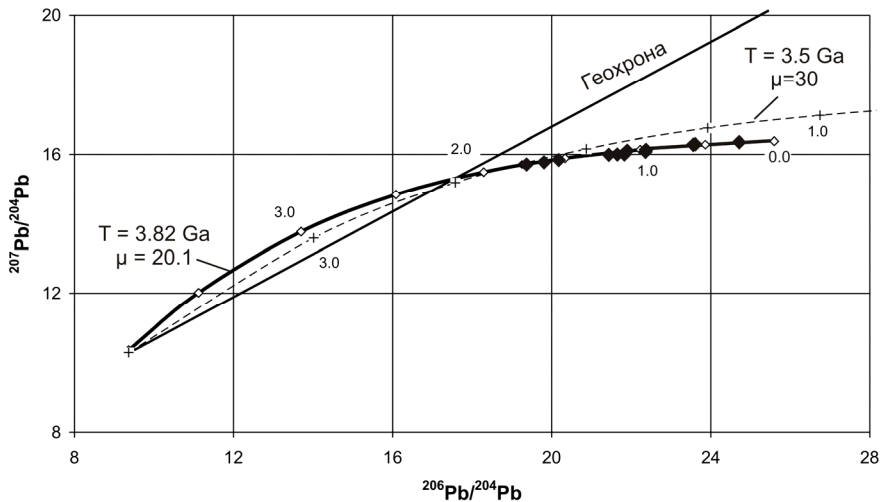


Рис. 5. Интерпретация отторженных свинцов из рудных месторождений южного края Сибирского кратона (северо-западное побережье оз. Байкал).

Точки галенитов разных месторождений (черные ромбы) аппроксимируются дискордией сопряженной модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордии с параметрами $T = 3,82$ млрд лет и $\mu = 20,1$. Для сравнения показана дискордия с параметрами $T = 3,5$ млрд лет и $\mu = 30$ (штриховая линия). Ее пересечение тренда точек галенитов соответствует наиболее ранним отторженным свинцам. Подобным образом можно рассчитать линию с параметрами $T > 3,82$ млрд лет и $\mu < 30$, которая будет пересекать тренд галенитов в той же точке, но будет располагаться ниже его

Сопоставление полученных значений T модели Холмса–Хаутерманса – конкордии–дискордии с событиями ранней Земли свидетельствует о том, что образование протолита Гарганского блока и южного края Сибирского кратона было связано с разными событиями: в первом случае – с завершением планетарной аккреции, а во втором – с завершением поздней тяжелой бомбардировки Земли космическими телами (рис. 6).

В глобальном контексте ранней Земли Гарганский блок принадлежал к территории, где кора оказалась консолидированной 4,31 млрд лет назад при сравнительно небольшом μ (11,0), а источником рудного вещества южного края Сибирского кратона служил протолит, находившийся в расплавленном состоянии позже – 3,82 млрд лет назад и с более высоким μ (20,1).

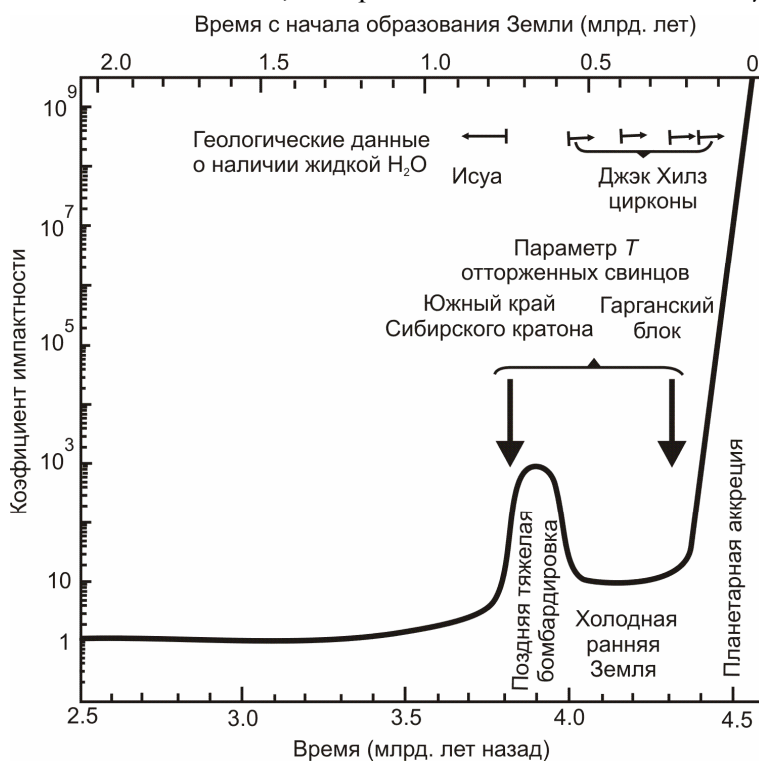


Рис. 6. Сопоставление главных импактных эпизодов ранней Земли с параметрами T , рассчитанными для отторженных свинцов.

Коэффициент импактности обозначает уровень метеоритных бомбардировок Земли по отношению к современному. Оценки временных вариаций метеоритных событий, геологические и геохронологические данные, свидетельствующие о холодной ранней Земле, приведены по работе [26]

Аномальные свинцы южного края Сибирского кратона являются, таким образом, показателем раннедокембрийского террейна, претерпевшего сравнительно позднюю деструкцию. С таким же (а возможно, тем же самым) деструктивным событием связано образование свинцов J-типа в ме-

сторождениях разлома Тинтина, Юкон [18]. В настоящее время пока неясно, насколько широко распространены свинцы этого типа в кратонных структурах Земли.

Заключение

Все радиогенные рудные свинцы Земли первоначально входили в состав замкнутых уран-свинцовых систем, от которых в некий момент были отторгнуты. Наилучшим образом процесс отторжения (сброса дочерних свинцов) описывается моделью конкордии–дискордии. Нами найдена связь между моделями Холмса–Хаутерманса и конкордии–дискордии. Диффузионная модель при отторжении всегда дает аномальные свинцы, но отторгнутые свинцы могут быть как нормальными, так и аномальными, в зависимости от момента T – замыкания U–Pb системы при кристаллизации пород и момента t – отторжения свинцов.

Использование модели для свинцов Гарганского блока и южного края Сибирского кратона с выходом в Байкало-Муйский террейн выявило резкое различие их параметров. Свинцы Гарганского блока В-типа характеризуют протолит, консолидированный 4,31 млрд лет назад, после снижения интенсивности начальной бомбардировки прото-Земли другими космическими телами, а свинцы J-типа южного края кратона – иной протолит, консолидированный 3,82 млрд лет назад, после поздней бомбардировки, произошедшей около 3,9 млрд лет назад. Значения μ в изотопных системах различались и составляли соответственно 11,0 и 20,1.

Свинцы южного края кратона были отторжены во временном интервале 1,80–0,25 млрд лет назад, а Гарганского блока – во временном интервале 2,35–1,40 млрд лет назад. Рудообразующие процессы начались на южном краю Сибирского кратона после его сборки в единый континент около 1,9–1,8 млрд лет назад и происходили на общем фоне последующей аккреции рифейских и фанерозойских террейнов. Рудообразующие процессы Гарганского блока, выраженные в изотопном составе свинцов, развивались в то время, когда блок был составной частью Восточной Гондваны, и прекратились с его включением в состав дрейфовавшего Тувино-Монгольского массива.

Список литературы

1. Золотое оруденение в кремнисто-карбонатных породах юго-восточной части Восточного Саяна / Е. В. Айриянц [и др.] // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 5. – С. 497–510.
2. Геодинамическая карта Палеоазиатского океана. Восточный сегмент / В. Г. Беличенко [и др.] // Геология и геофизика. – 1994. – Т. 35, № 7–8. – С. 29–40.
3. Баргузинский микроконтинент (Байкальская горная область): к проблеме выделения / В. Г. Беличенко [и др.] // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 10. – С. 1049–1059.

4. Об абсолютном возрасте магматических комплексов Байкальского и Приморского хребтов (Западное Прибайкалье) / С. Б. Брандт [и др.] // Сов. геология. – 1978. – № 3. – С. 142–148.
5. Геодинамика палеозойских океанов Центральной Азии / А. Н. Диденко [и др.] // Геология и геофизика. – 1994. – № 7–8. – С. 59–75.
6. Ильин А. В. О Тувино-Монгольском массиве // Тр. НИИ «Зарубежгеология». – Вып. 22. Материалы по региональной геологии Африки и зарубежной Азии. – М. : Недра, 1971. – С. 67–73.
7. Верхнерифейские (790 млн лет) гранитоиды в Тувино-Монгольском массиве: свидетельство раннебайкальского орогенеза / А. Б. Кузьмичев [и др.] // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 10. – С. 1379–1383.
8. Таинское золоторудное месторождение (Восточный Саян, Россия) – редкий тип золото-порфировой формации / А. Г. Миронов [и др.] // Геология рудных месторождений. – 2001. – Т. 43, № 5. – С. 395–413.
9. Центральнo-Азиатский складчатый пояс: геодинамическая эволюция и история формирования / А. А. Моссаковский [и др.] // Геотектоника. – 1993. – № 6. – С. 3–33.
10. U–Pb-геохронологические и Rb-изотопные свидетельства герцинского этапа рудогенеза в пределах протерозойского обрамления юга Сибирской платформы (Северо-Западное Прибайкалье) / Л. А. Неймарк [и др.] // ДАН СССР. – 1993. – Т. 333, № 6. – С. 765–767.
11. Изотопы свинца в золоторудных месторождениях Восточного Саяна (Россия) / Л. А. Неймарк [и др.] // Геология рудных месторождений. – 1995. – Т. 37, № 3. – С. 237–249.
12. Ранняя история Земли : пер. с англ. / под ред. Б. Уиндли. – М. : Мир, 1980. – 360 с.
13. Rb–Sr-изотопная систематика гранитоидов Гарганской и Окинской зон Восточного Саяна / С. В. Рассказов [и др.] // Геодинамические режимы формирования Центральнo-Азиатского складчатого пояса : сб. науч. тр. ИГУ. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – С. 106–136.
14. Мантийная аномалия DUPAL Тувино-Монгольского массива и ее палеогеодинамическое значение / С. В. Рассказов [и др.] // ДАН. – 2002. – Т. 382, № 1. – С. 110–114.
15. Позднепалеозойские субщелочные и редкометалльные гранитоиды юго-восточной части Восточного Саяна (Геохимические характеристики и Rb–Sr-изотопная систематика) / С. В. Рассказов [и др.] // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 11. – С. 1133–1144.
16. Радиоизотопная геология в задачах и примерах / С. В. Рассказов [и др.]. – Новосибирск : Гео, 2005. – 268 с.
17. Сибирский кратон: формирование, алмазонасность / О. М. Розен [и др.]. – М. : Научный мир, 2006. – 212 с.
18. Сэй-Ли Куо. Геология изотопов свинца рудных месторождений, пространственно приуроченных к желобу Тинтина, территория Юкон / Куо Сэй-Ли, Р. Фолинсбери // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. – М. : Мир, 1977. – С. 130–148.
19. Прогнозирование золотого оруденения на юге Восточной Сибири и Дальнего Востока: геологический и изотопно-геохимический аспекты / Ю. И. Твритинов [и др.]. – Иркутск : Ин-т земной коры СО РАН, 2006. – 224 с.

20. Timing of Early Proterozoic collisional and extensional events in the granulite–gneiss–charnokite–granite complex, Lake Baikal, USSR: A U–Pb, Rb–Sr, and Sm–Nd isotopic study / M. Aftalion [et al.] // *J. Geology*. – 1991. – Vol. 99. – P. 851–861.

21. Radiogenic argon distribution within a mineral grain: implications for dating of hydrothermal mineral-forming event in Sludyanka complex, Siberia, Russia / I. S. Brandt [et al.] // *Isotopes Environ. Health Stud.* – 2006. – Vol. 42, N 2. – P. 189–201.

22. *Dickin A. P.* Radiogenic isotope geology / A. P. Dickin. – Cambridge : University Press, 1997. – 490 p.

23. *Halliday A. N.* Terrestrial accretion rates and the origin of the Moon / A. N. Halliday // *Earth Planet. Sci. Letters*. – 2000. – Vol. 176. – P. 17–30.

24. *Hamilton E. I.* Applied geochronology / E. I. Hamilton. – L. ; N. Y. : Academic Press, 1965. – 128 p.

25. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U–Pb and Pb–Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications / Khain E. V. [et al.] // *Earth Planet. Sci. Letters*. – 2002. – Vol. 199. – P. 311–325.

26. A cool early Earth / J. W. Valley [et al.] // *Geology*. – 2002. – Vol. 30. – P. 351–354.

Ore leads from the Gargan block and southern margin of the Siberian craton: conjugated Holmes–Houtermans – Concordia–Discordia models

Rasskazov S. V., Brandt S. B.

Abstract. The conjugated Holmes–Houtermans – Concordia–Discordia model has been substantiated with determination of μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$), moments of U–Pb-system closure T and separation t . The model has been applied for interpretation of separated leads from ore deposits in Archean terranes of Central Asia: the Gargan block and southern margin of the Siberian craton. Leads of B-type from the former are interpreted as separated from a protolith of 4,31 Ga in a time interval of 2,35–1,40 Ga and J-type leads from the latter as separated from another protolith of 3,82 Ga in a time interval of 1,80–0,25 Ga. The former protolith ($\mu = 11,0$) is referred to the end of the initial planetary accretion and the latter one ($\mu = 20,1$) to the end of the late meteoritic bombardment of the early Earth about 3,9 Ga.

Key words: gold deposits, Asia, early Earth, Pb isotopes.

Рассказов Сергей Васильевич
доктор геолого-минералогических наук,
профессор
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
заведующий лабораторией
тел.: 8(3952) 51-16-59

Брандт Сергей Борисович
доктор геолого-минералогических наук,
профессор
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
главный научный сотрудник
тел.: 8(3952) 51-16-59
факс: (3952) 42-70-00