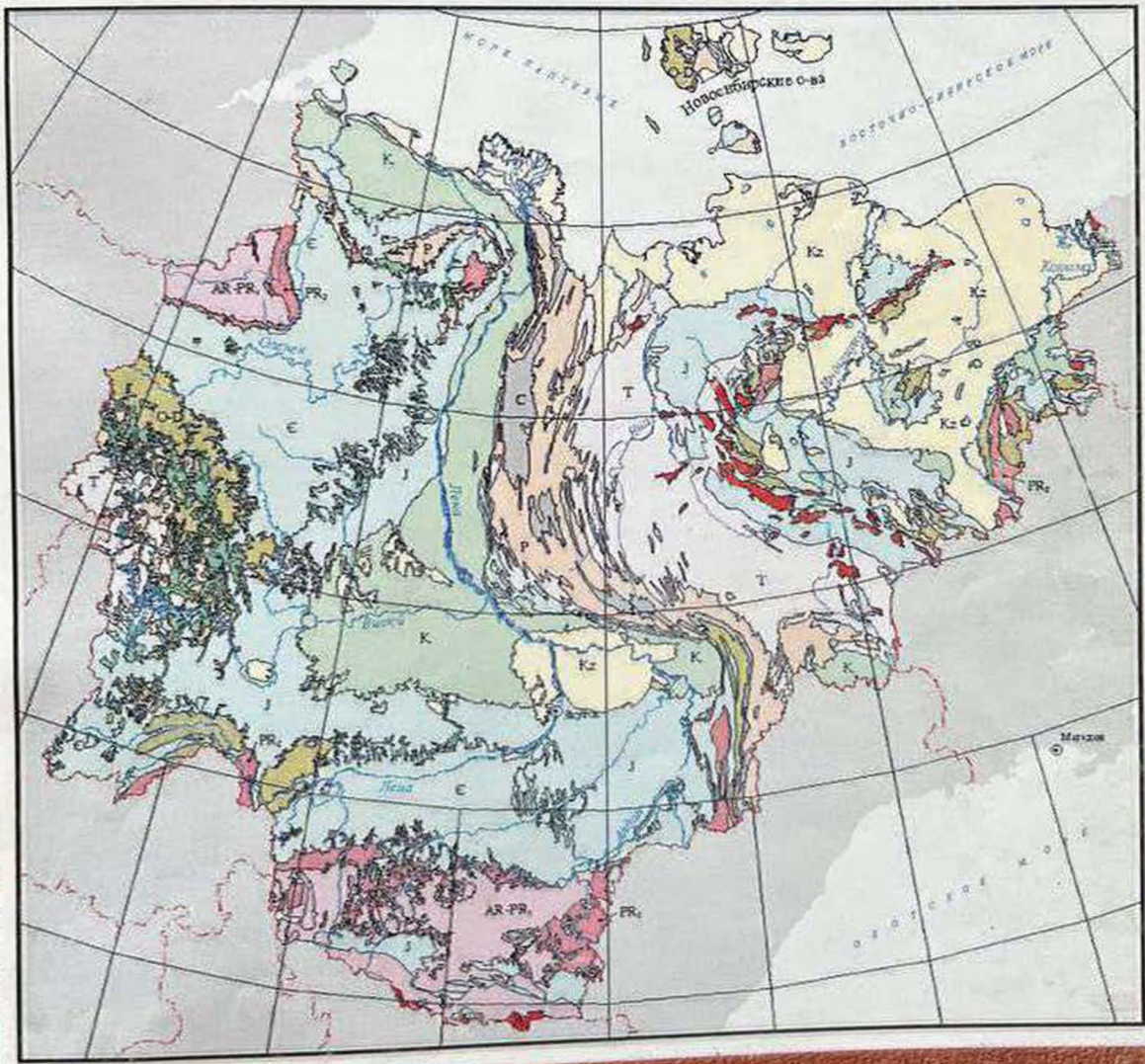
ВЕСТНИК ГОСКОМГЕОЛОГИИ

Галицкого В.С.

№ 1(4)
2003

Материалы по геологии
и полезным ископаемым
Республики Саха (Якутия)



Якутск

УДК 550.93

ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ВЕРХОЯНЬЕ КАК ДОСТОВЕРНЫЙ КРИТЕРИЙ МЕЖСЕРИЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СЕРИЙНЫХ ЛЕГЕНД ГОСГЕОЛКАРТЫ-200 РФ

Е.Е. Порошин[*], **А.Г. Рублев**[*], **А.П. Кропачев**[*], **В.В. Русс**[*], **В.С. Гриненко**[**]

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского[*]
ГУП «Якутская поисково-съемочная экспедиция»[**]

Введение

Основной задачей изотопной геохронологии на современном этапе ее развития является получение доказательств реальности (истинности) измеренных значений возраста. Это особенно важно в тех случаях, когда геохронологическая и геологическая информации противоречат друг другу и необходимо оценить степень их достоверности для принятия правильного решения. При использовании изотопной геохронологии поиск таких доказательств должен вестись, прежде всего, с помощью изотопных критериев и только при их недостаточности могут и должны привлекаться геологические данные. Чем вызвана необходимость применения независимых от геологических изотопных критериев достоверности получаемых возрастов? Почему неправомочно часто высказываемое особенно среди геологов мнение о достаточности простого сопоставления измеренного возраста с геологическими данными? Дело в том, что при однозначности геологического возраста любого объекта изотопные методы применяются в двух целях: для уточнения геохронологической шкалы и отработки приемов датирования. В результативном плане нет необходимости их использования. В остальных случаях (а они, по-видимому, преобладают) ориентировка на условно принятый геологический возраст представляется неправомерной, т.к. не изотопные методы будут контролировать правильность геологических построений, а недостаточно обоснованные геологические данные будут привлекаться для обоснования изотопных датировок.

При отсутствии независимых изотопных критериев истинности измеренного возраста его значение допускает множественность вариантов интерпретации, в том числе и таких, которые устраивают каждого конкретного специалиста. В таких случаях изначальная неоднозначность геологической датировки, как правило, не учитывается, т.к. серьезные основания считать ее ошибочной (если это действительно имеет место) отсутствуют. В силу этого при принятии решения геолог опирается на более близкое ему геологическое обоснование возраста и различные субъективные факторы (мнения авторитетов, традиции и др.) даже при наличии однозначных изотопных доказательств.

Проблема поисков внутренних, изотопных критериев достоверности выявилась сразу же, как стало очевидным, что получаемая любым из методов цифра возраста по какому-либо материалу далеко не всегда отвечает его истинному значению. Именно тогда стало ясно, что под действием различных природных процессов может происходить миграция радиоактивных и радиогенных изотопов. Дополнительную неопределенность вносило (и вносит) априори – неизвестное количество и изотопный состав тех изначально присутствующих в исследуемом материале элементов, которые содержат радиогенные изотопы. Эти обстоятельства заставили и заставляют искать возможности для устранения или учета искажающих факторов. В результате нескольких десятилетий изучения реальных геологических ситуаций, опытов по моделированию природных процессов, повышению точности и чувствительности аналитических методик, внедрения новых способов обработки каменного материала, совершенствования способов интерпретации получаемой информации удалось выработать достаточно четкие критерии надежного датирования широкого круга пород практически во всем диапазоне геологического времени.

Естественно, в природе могут происходить случаи многократных и разнотипных воздействий

на объект изучения, расшифровка и учет которых пока невозможны. Существование подобных причин убеждает в том, что получение надежных изотопных возрастов предполагает методологически корректную постановку изотопно-геохронологических исследований, заключающую в себе следующие основные этапы: 1) четкую формулировку задачи, учитывающую известные особенности исследуемого объекта и возможности изотопных методов; 2) отбор качественного материала, адекватного поставленной задаче; 3) получение правильных аналитических данных с необходимым уровнем точности; 4) применение соответствующих полученным данным приемов интерпретации и их независимую проверку (в случае необходимости); 5) сопоставление конечных выводов с надежно установленными геологическими данными и определение места изученного объекта в истории геологического развития региона. Именно по такой схеме мы попытались построить настоящее изложение проблемы, хотя, по-видимому, и не смогли осуществить все задуманное.

Состояние проблемы

На территории Юдомской и Верхоянской серийных легенд ГГК-200 РФ нового поколения сосредоточено до 90-95% рифейско-палеозойских магматических образований Восточной Якутии. Несмотря на то, что почти вся территория занята геологосъемочными работами масштаба 1:200 000 и более 50% ее – съемками масштаба 1:50 000 при наличии многочисленных тематических исследований вопросы расчленения, корреляции и определения возрастного объема магматических комплексов остаются дискуссионными. Особенно актуальны они при выделении сходных по составу и петрографическому облику силлово-дайковых долеритовых и сложных по строению полифазных (полиформационных?) щелочно-ультраосновных с карбонатитами комплексов.

В результате сбора, систематизации и анализа имеющихся на данный момент геологических и изотопно-геохронологических материалов созданы макет рабочей легенды и схема распространения ареалов рифей-палеозойских магматических комплексов Восточной Якутии (Юдомская и Верхоянская серии листов ГГК-200) [9]. При сравнении схем корреляции, в том числе серийных легенд выявлены резкие противоречия в понимании разными авторскими коллективами объема комплексов, их возраста и положения в легендах геологических карт разного масштаба. К причинам, вызывающим подобные разногласия, следует отнести недостаточную геологическую изученность как комплексов в целом, так и отдельных магматических тел, а также отсутствие надежных критериев расчленения, в том числе геохимических и геохронологических [5]. Особенно слабо разработаны вопросы расчленения разновозрастных, сходных по составу и строению габбро-долеритовых комплексов, ареалы которых перекрывают друг друга (до четырех ареалов на площади). Из девяти комплексов только по двум установлены современные, достаточно достоверные датировки, и только один из них может быть выделен в качестве валидного. Расчленение и корреляция щелочно-ультраосновных комплексов упираются в сложности достоверного определения возраста выделяемых фаз магматизма. Так, из трех выделенных на территории Юдомской серии листов комплексов только в одном массиве имеются надежные датировки двух фаз (из четырех), для остальных комплексов достоверные определения возраста отсутствуют.

В целях оценки достоверности и возможности использования изотопно-геохронологических данных при картировании создан их каталог для рифей-палеозойских магматических образований Восточной Якутии, включающий в себя 3163 определения возраста по 1067 объектам, в том числе 620 определений по 242 объектам Юдомской серии и 1128 определений по 278 объектам Верхоянской серии листов ГГК-200. В результате экспертной оценки значимости и достоверности собранной информации оказалось, что на территории Восточной Якутии надежно датирован возраст только 40 объектов, остальные – недостаточно или характеризуют верхнюю возрастную границу образования, возможно, время наложенных процессов (таблица). Это составляет менее 4% от числа изученных объектов. Среди рифей-палеозойских магматических образований исследуемой территории на современном уровне датировано всего три комплекса: улаханбамский, суордахский и лединский (массив Поворотный). В последнем из четырех выделенных фаз датированы две. Такое положение при создании Госгеолкарт-200 нового поколения не может не вызвать беспокойства. Требуется уточнение особенностей строения основных петротипов магматических образований на территории Восточной Якутии и практически полная их передатировка. В этих целях разработана и в статье изложена методология изотопно-геохронологических исследований в Верхоянье и приведены (пока еще предварительные) рекомендации определения возраста магматических пород K-Ar, Rb-Sr, U-Pb, Sm-Nd-методами.

Объекты с разной степенью достоверности геохронологических датировок

Серии листов ГГК-200	Объекты с относительно достоверно определенным возрастом	Объекты с предполагаемым верхним возрастным пределом их формирования	Объекты с геохронологическими датами, не позволяющими определить их возраст
Юдомская	10	78	154
Верхоянская	15	119	144
Яно-Индигирская	13	124	191
Колымская	2	26	110
Олойская	-	13	31
Охотская	-	13	8
Нижнеленская	-	2	1
Новосибирских островов	-	2	-
ВСЕГО	40	377	639

Основные положения изотопно-геохронологических исследований

Вопросы методологии использования изотопных методов применительно к датированию различных магматических пород Восточной Якутии рассматриваются во многочисленных публикациях и обобщены в ряде монографий [6-8 и др.]. В этом разделе нами освещаются основные особенности применения K-Ar, U-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd методов, использованных в Верхоянье при датировании магматических пород фанерозоя.

Калий-аргоновый метод. Обширный материал, накопленный за все время изучения магматитов Восточной Якутии, датирование которых выполнено с применением K-Ar метода [1-3, 10-11 и др.], позволяет сформулировать следующие основные положения:

1) различные минералы обладают отличающейся друг от друга устойчивостью своих K-Ar систем к искажениям в ходе наложенных процессов;

2) основной причиной искажений является тепловое воздействие, приводящее к потерям радиогенного аргона, т.е. к уменьшению измеряемого возраста;

3) химические преобразования минералов также нарушают K-Ar системы в ту или иную сторону. Закономерности этих искажений недостаточно изучены для их использования при интерпретации, но эффект таких преобразований может быть минимизирован анализом петрографически "свежих" проб. Контроль за степенью химических преобразований для ряда минералов может быть осуществлен путем предварительного определения содержания калия (например, для биотитов оно должно быть не менее 6%);

4) степень термических потерь аргона определяется температурой и длительностью наложенного процесса и зависит от типа минерала. В большинстве случаев термические наложенные процессы не приводят к видимому изменению породы и слагающих ее минералов;

5) при определенных условиях возможен захват аргона минералами как при их образовании, так и в результате наложенных процессов. Количество захваченного аргона зависит от параметров процесса и типа минералов. Закономерности этого явления изучены недостаточно.

Анализ этих положений приводит в первую очередь к однозначному выводу о бесполезности применения валовых проб при K-Ar датировании. Действительно, K-Ar система породы представляет собой сумму K-Ar систем слагающих ее минералов. Если эти минералы не захватывали аргон при своем образовании (такой захват аргона – достаточно редкое явление, наблюдавшееся в ряде случаев для основных, ультраосновных и щелочных пород) и не теряли накопленный радиогенный аргон в ходе наложенных процессов, то их K-Ar системы не будут искажены и, следовательно, не будет искажен и K-Ar возраст породы в целом. Поскольку выполнение указанных условий априори не может быть установлено, то отсутствие осложняющих эффектов должно проявляться в совпадении измеренных значений возраста различных минералов. Поэтому реальность измеренного возраста по "валу" может быть определена только анализом минералов. Если же имели место наложенные процессы, то все минералы (или некоторые из них) будут иметь различный измеренный возраст, а K-Ar система породы в результате отразит средневзвешенное K-Ar отношение по всем ее составным частям. Как правило, это отношение будет соответствовать заниженному возрасту. В таких ситуациях возможность установления реального возраста дает только сопоставление измеренных минеральных возрастов в серии проб из данного объекта.

То есть и в этом случае необходимо использование минералов. В связи с вышеизложенным следует остановиться на одной и весьма распространенной ошибке, встречающейся при интерпретации валовых датировок. Она заключается в том, что за реальный возраст принимается среднее значение (максимум на гистограммах) из измеренных возрастов. На самом деле истинный возраст породы – не меньше среднего из тех максимальных, которые попадают в область погрешности измерения (и это в случае отсутствия "избыточного аргона", что доказать по валовым датировкам невозможно).

Как указывалось выше, различная способность минералов к потерям аргона установлена вполне однозначно. В соответствии с этими данными все наиболее употребимые в K-Ar геохронологии минералы интрузивных пород можно расположить в определенной последовательности. В порядке убывания устойчивости к наложенным термическим процессам эта последовательность (так называемый ряд устойчивости минералов к потерям аргона) выглядит следующим образом: амфибол (пироксен)–мусковит–нефелин–биотит-полевые шпаты. При достаточно высоких температурах наложенных процессов (ориентировочно более 300°C) возможна инверсия измеренных возрастов биотита и полевых шпатов.

Разница в устойчивости минералов (температура открытия их K-Ar систем) такова, что, например, полные потери аргона биотитом могут не сопровождаться сколько-нибудь существенными потерями аргона амфиболом или мусковитом из той же пробы. Именно эти особенности K-Ar систем и позволяют проводить интерпретацию измеряемых значений возраста. Если порода не испытала термических воздействий, приводящих к потерям аргона даже из полевых шпатов, то при отсутствии изначально захваченного аргона все измеренные минеральные возрасты каждой пробы окажутся одинаковыми и будут отвечать времени кристаллизации породы. Аналогичная ситуация сложится и при достаточно интенсивном процессе, когда полные потери аргона произойдут даже из амфиболов. В этом случае одинаковые измеренные возрасты будут фиксировать время проявления этого процесса, температура которого ориентировочно должна превышать 350-400°C. Отличить одну ситуацию от другой позволяет либо сопоставление с результатами других изотопных методов, более "консервативных" в термических процессах (U-Pb и Rb-Sr), либо наличие противоречия с надежно установленным, по геологическим данным, верхним возрастным пределом для времени образования породы. Но в любом случае совпадение измеренных возрастов всех минералов определяет время реального геологического события.

При промежуточных интенсивностях наложенных процессов измеренные возрасты минералов одной пробы будут различными и соответствовать ряду устойчивости. Это позволяет сразу же провести предварительную интерпретацию результатов: возраст породы должен быть не меньше, чем измеренный возраст минерала с наилучшей устойчивостью. В случае неоднократных воздействий процессов промежуточных интенсивностей интерпретация усложняется, но не принципиально. Это не означает, что точное определение возраста пород при наличии дискордантности K-Ar данных невозможно. Так, если совпадают возрасты амфибола и биотита, а полевые шпаты "омоложены", то значение возраста для первых отвечает времени образования пород (или интенсивного наложенного процесса того времени). При дискордантности всех минеральных возрастов необходимо изучение их соотношений в серии проб, т.к. в зависимости от интенсивности наложенного процесса эти соотношения будут меняться. Анализ этих изменений позволяет выявить наименее искаженные результаты и сделать соответствующие выводы.

Серьезные сложности может вызвать присутствие избыточного аргона, диагностика которого, не говоря уже о его учете, не всегда является простой задачей. В практическом отношении важно, что это явление значительно более редкое, нежели потери аргона. При этом чаще всего в интрузивных породах избыточный аргон содержится в плагиоклазах, значительно реже – в биотитах и амфиболах и пока достоверно не обнаружен в калишпатах (кроме, возможно, щелочных пород) и мусковитах. Как правило, избыточное содержание аргона приводит к нарушению ряда устойчивости, хотя возможен и относительно редкий случай захвата аргона амфиболом, при котором этот ряд сохраняется. Это может привести к неверным выводам при отсутствии геологических ограничений и данных других методов.

Даже такого краткого рассмотрения основных характеристик K-Ar систем достаточно, чтобы сформулировать главные требования к исследуемому материалу:

1) доказательное определение возраста с помощью K-Ar метода возможно только для пород,

содержащих в выделяемом количестве минералы с различной сохранностью радиогенного аргона, в том числе обязательно амфибол или слюды;

2) использование какого-либо одного минерала не представляет доказательств реальности возраста исследуемого объекта, помогая в лучшем случае определить лишь верхний возрастной предел. Исключение может составить лишь мусковит, имеющий хорошую устойчивость K-Ar системы и не захватывающий аргон, но только в случае надежных геологических ограничений;

3) в большинстве случаев необходимо использование серии проб из пород изучаемого объекта (не менее 2-3), разделенных на используемые в K-Ar геохронометрии минералы;

4) исследуемые породы или по крайней мере выделенные из них минералы должны быть петрографически "свежими".

К сказанному следует добавить и учет ряда геологических факторов. Поскольку многие интрузивные массивы многофазны, а иногда и полихронны, необходимо отдельное изучение каждой разновидности слагающих их пород, тем более, что это существенно расширяет возможности интерпретации результатов. Кроме того, отбор проб следует проводить на максимальном (по возможности) расстоянии от прорывающих интрузий. Очевидно, требуется отсутствие в исследуемых пробах ксеногенного материала.

Таковы некоторые особенности применения K-Ar метода. Выводы, сделанные с его помощью, могут потребовать подтверждения независимыми данными других изотопных методов. Вместе с тем правильное применение K-Ar метода, особенно к фанерозойским породам дает возможность получения достаточных доказательств и при его самостоятельном использовании. Однако последнее реализуется только при наличии геологических данных, надежно фиксирующих возрастные пределы (или хотя бы один из них).

Ниже рассматриваются вопросы сопоставления результатов K-Ar и других методов.

Рубидий-стронциевый метод. Rb-Sr метод основан на β-распаде изотопа рубидия ^{87}Rb и превращения его в стабильный изотоп ^{87}Sr. Последний образует радиогенную добавку к стронцию, уже находящемуся в породе или минерале, добавку тем большую, чем выше содержание рубидия и чем дольше шло накопление радиогенного ^{87}Sr. Метод применим для определения возраста минералов и пород, содержащих рубидий. Очевидно, что чем меньше количество радиогенного стронция в породе, тем труднее оно поддается точному измерению и тем ниже достоверность определяемого возраста породы. При датировании относительно молодых фанерозойских пород точность и чувствительность приемов изотопного анализа существенно ограничивают возможности Rb-Sr метода. Он применим в первую очередь к гранитоидам и вулканитам кислого состава, в которых Rb входит изоморфной примесью, замещая калий, в состав основных породообразующих минералов (калишпат, биотит, мусковит). Но даже гранитоиды далеко не всегда могут быть использованы для Rb-Sr датирования в силу низкого содержания радиогенного стронция в них. Что касается фанерозойских основных и тем более ультраосновных пород, то они до сих пор остаются крайне неблагоприятными объектами для датирования данным методом.

Установлено, что порода, как правило, представляет собой более прочную Rb-Sr систему, чем отдельные минералы (это положение вполне справедливое для интрузивных пород, далеко не всегда соблюдается в вулканических породах, порфировые включения которых обладают зачастую значительно большей прочностью Rb-Sr системы, чем микролитовая основная масса). Поэтому в отличие от U-Pb и K-Ar методов Rb-Sr в основном применяют к анализу образцов породы в целом, если он используется в комплексе с другими. При самостоятельном применении Rb-Sr метода использование минералов практически должно быть обязательным.

Обычно Rb-Sr метод используется в так называемом изохронном варианте, при котором анализируется совокупность проб, отвечающая следующим условиям изохронной модели: 1) все пробы должны быть одновозрастны; 2) в момент образования они должны иметь одинаковый изотопный состав Sr, т.е. быть образованы из единого источника с гомогенным изотопным составом стронция; 3) со времени образования порода в объеме пробы должна оставаться закрытой системой относительно Rb и Sr.

Если анализируемая серия проб отвечает условиям изохронной модели, то аналитические данные в системе координат $^{87}Rb/^{86}Sr$-$^{87}Sr/^{86}Sr$ подчиняются линейной зависимости и описываются уравнением прямой типа $y = ax+b$. Возраст (t) определяется углом наклона прямой (α) и рассчитывается по формуле $t = {}^{1}/_{\lambda}(1+tg\alpha)$. Полученное значение t интерпретируется как момент последней гомогенизации изотопного состава

стронция, а отрезок, отсекаемый прямой по оси ординат – как первичное изотопное отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ (IR) в анализируемых породах. Его величина зависит от источника вещества и предшествующей истории развития породы и может служить важным генетическим признаком. Для фанерозойских магматических пород полученная Rb-Sr дата чаще всего фиксирует время их кристаллизации, т.е. возраст породы. При интерпретации результатов следует обращать внимание и на величину IR, которая в принципе не может быть меньше 0,7000, а для фанерозойских пород – меньше 0,703. При этом очень большие значения данного параметра (больше 0,720-0,750) для магматических пород должны привлечь особое внимание, т.к. это свидетельствует либо о наложенных процессах, либо о переплаве древних кислых пород, либо о том, что наклон аппроксимирующей прямой («изохроны») обусловлен не только радиогенным эффектом.

Основные ограничения Rb-Sr изохронного метода связаны с отклонением исследуемых пород от изохронной модели, которое может быть обусловлено либо негомогенностью первичного изотопного состава стронция, либо привносом или выносом рубидия или стронция после кристаллизации без последующей гомогенизации изотопного состава стронция. Первая причина связана с первичной неоднородностью исходного вещества, часто фиксируемой лишь на тонком петрохимическом или геохимическом уровнях. Вторая причина обусловлена, как правило, миграцией через породу жидкой или газово-жидкой фаз. Подвижность рубидия и стронция будет при этом процессе возрастать с увеличением объема газово-жидкой фазы, ростом P-T параметров процесса, в присутствии специфических химических агентов, способствующих выносу рубидия и стронция. В то же время есть данные, что при «сухом» метаморфизме даже очень высокие температуры могут не нарушить Rb-Sr систему породы в целом.

Существующие приемы статистической обработки позволяют определить, соответствует ли совокупность Rb-Sr данных изохронной модели и оценить тем самым достоверность полученного значения возраста. Главным критерием при этом выступает величина параметра СКВО (средний квадрат взвешенных отклонений). Если эта величина существенно отличается от единицы (3 и более), это означает, что разброс точек от аппроксимирующей прямой превышает аналитическую погрешность, т.е. нарушены условия изохронной модели.

Большую роль в надежном определении возраста Rb-Sr методом играет построение так называемых внутренних изохрон по составляющим породу минералам (калишпат, биотит, мусковит, плагиоклаз, апатит). Совмещение изохроны по породе в целом с внутренней изохроной указывает для петрографически "свежей" породы на отсутствие сколько-нибудь интенсивного вторичного процесса. Различие между изохронами (или отклонение точек минералов от валовой изохроны) позволяет выявить влияние наложенных процессов. При этом внутренняя изохрона фиксирует время последующего геологического события, приведшего к перераспределению радиогенного стронция между минералами.

К сожалению, до сих пор не найдены надежные критерии, позволяющие заранее предугадать, будут ли соответствовать взятые пробы изохронной модели. Значимую помощь может оказать изучение распределения рубидия и стронция в исследуемом объекте. Хорошо известно, что в неизмененных гранитоидах, как правило, существует четкая отрицательная связь между рубидием и стронцием, обусловленная различными геохимическими свойствами этих элементов. Вторичные процессы (альбитизация, калишпатизация, мусковитизация и пр.) нарушают эту корреляцию. Вполне очевидно, что для датирования следует брать именно те пробы гранитоидов, которые определяют обратную корреляцию рубидия и стронция. Однако следует иметь в виду, что нарушение такой связи может быть вызвано и автометасоматическими процессами, а граниты метасоматического генезиса изначально могут не обладать такой корреляцией. В качестве индикатора петрографически не диагностируемых реакций изотопного обмена между магматическими породами и вмещающей средой или флюидом можно использовать изотопный состав кислорода. И все-таки наиболее надежный способ получения неискаженных значений возраста – это корректное изотопно-геохронологическое опробование.

К отбору совокупности проб, характеризующих конкретный геологический объект, предъявляют самые серьезные и строгие требования. В общем виде эти требования можно сформулировать так: геологический материал должен отражать изучаемый процесс, будь это кристаллизация пород или вторичные процессы (метасоматоз, метаморфизм, выветривание) в максимально "чистом" виде и обладать рубидий-стронциевыми характеристиками, обеспечивающими надежность изотопных измерений. Кон-

кретные требования к отбору представительных проб на Rb-Sr изохронное датирование кратко сводятся к следующему:

1) пробы должны отбираться на участках, не затронутых более поздними процессами, вдали от контактов с породами иного возраста и быть петрографически максимально "свежими". Все составные части пробы должны быть когенетичными, т.е. не должны содержать ксеногенный материал, а синхронность порфиробластеза должна быть заранее доказана. Желательно, чтобы петрографические, минералогические, петрохимические исследования опережали датирование;

2) не следует объединять в одну группу такие разновидности пород, одновременность образования которых или единство источника геологически не очевидны (например, породы разных фаз магматизма или вулканических покровов). Пробы таких пород должны анализироваться как самостоятельные группы и именно результаты Rb-Sr датирования смогут помочь решению вопроса об их возможном генетическом единстве;

3) для получения максимального спектра величин Rb/Sr отношений желательно, чтобы отбираемые пробы представляли имеющуюся на данном объекте гамму разностей от самой лейкократовой породы до самой меланократовой (естественно, представляя одну фазу);

4) объем проб должен обеспечивать замкнутость Rb-Sr системы в них. В настоящее время нет какого-то одного общего правила для выбора оптимального объема. Опыт показывает, что Rb-Sr система в интрузивных породах обладает лучшей сохранностью, чем в вулканитах, для которых Rb-Sr даты даже при мезозойском возрасте пород могут оказаться омоложенными. Возможные причины такого эффекта – перекристаллизация минеральных ассоциаций, очень чувствительных к процессам метаморфизма и выветривания, повсеместное развитие карбонатизации и просто уменьшение гидростатического давления в породе при постепенном подъеме ее к поверхности, сопровождаемое выносом части радиогенного стронция при удалении влаги из межзернового пространства. Среди интрузивных пород предпочтительнее для Rb-Sr датирования мелкозернистые массивные породы. Подобранный эмпирически вес проб составляет 1-2 кг для мезозойских и 2-5 кг для палеозойских пород.

Выбор конкретных проб на изохронное датирование делается исходя из содержаний в них рубидия и стронция, при предварительном определении – рентгено-спектральным путем или методом пламенной фотометрии. Наблюдаемой разнице в величине Rb/Sr для серии проб должно соответствовать такое смещение изотопного состава стронция, которое может быть измерено с приемлемой точностью. В противном случае геологический материал либо вообще непригоден для Rb-Sr изотопного датирования, либо необходимо отобрать дополнительно более лейкократовые разности. Для изохронных построений следует отобрать 6-8 проб, равномерно распределенных по всему диапазону наблюдаемых Rb/Sr отношений.

Самарий-неодимовый метод основан на радиоактивном распаде (α-распад) ^{147}Sm и превращении его в ^{143}Nd. По своей сути этот метод аналогичен Rb-Sr методу и также используется исключительно в изохронном варианте. При этом изохронный график строится в координатах $^{147}Sm/^{144}Nd$ (горизонтальная ось) – $^{143}Nd/^{144}Nd$ (вертикальная ось). Все условия изохронной модели и критерии достоверности остаются прежними.

Имеются два принципиальных отличия Sm-Nd метода от Rb-Sr. Первое заключается в большей схожести геохимических свойств Sm и Nd, в результате чего Sm/Nd отношение в породах и минералах варьирует достаточно слабо. В силу этого, а также значительно большего периода полураспада самария по сравнению с рубидием метод используется в основном для древних пород, хотя по мере повышения точности измерения изотопного состава Sm-Nd метод достаточно успешно используется уже и для палеозойских пород. Второе отличие связано с тем, что Sm-Nd метод в силу характера распределения этих элементов в породах и минералах в основном применяется к датированию основных пород. В этом плане Sm-Nd метод как бы дополняет Rb-Sr, который, как правило, используется при датировании пород кислого состава.

Близость геохимических свойств Sm и Nd (оба являются редкоземельными элементами) делает Sm-Nd систему значительно более устойчивой к наложенным воздействиям. Так, отношение Sm/Nd практически не меняется при гипергенных процессах и в условиях метаморфизма, что существенно расширяет возможности метода в получении истинного возраста. Значительное фракционирование Sm и Nd зафиксировано пока лишь при гидротермальной проработке исследуемых пород.

Следует отметить, что отношение $^{147}Sm/^{144}Nd$ в породах исключительно редко выходит за пределы 0,1 0,2, тогда как в некоторых минера-

лах оно может оказаться довольно значительным (например: в гранатах – до 0,5, флюоритах и вольфрамитах – до 1-2). Это создает благоприятные условия для датирования метаморфических гранатсодержащих пород, а также рудных объектов, для которых достаточно точное определение возраста возможно даже для мезозойских образований.

Основные сложности в Sm-Nd методе связаны с возможной негомогенностью исследуемой серии проб по первичному отношению ($^{143}Nd/^{144}Nd$) в результате либо контаминации, либо негомогенности расплава. Еще одной причиной может стать неравновесность по этому отношению минералов в кристаллизующейся магме (если, например, кристаллы пироксена оказались захваченными магмой при ее продвижении к поверхности). В этом методе при исследовании метаморфических пород также велика вероятность получения так называемых "изохрон с первичным наклоном" и именно в силу консервативности Sm-Nd системы и связанной с этим «памятью» о протолите.

При изучении Sm-Nd систем различных пород имеется возможность определить время отделения их протолита от деплетированной мантии, T(DM), по измеренному значению первичного неодима (ε_{Nd}). Этот расчет осуществляется в рамках определенных моделей, доказательство реальности которых – сложная и практически невыполнимая задача. В силу этого получаемые значения T(DM) должны рассматриваться как сугубо ориентировочные и могут в лучшем случае задавать нижний возрастной предел для исследованных пород. Использование их для оценки возраста пород недопустимо.

Уран-свинцовый метод. При изотопно-геохронологических исследованиях пород и геологических процессов одним из ведущих является уран-торий-свинцовый метод, использующий накопление радиогенных изотопов свинца ^{206}Pb, ^{207}Pb и ^{208}Pb при естественном радиоактивном распаде ^{238}U, ^{235}U и ^{232}Th. Значения возраста при этом рассчитываются по соотношениям $^{206}Pb/^{238}U$, $^{207}Pb/^{235}U$ и $^{208}Pb/^{232}Th$. Благодаря значительной разнице в скоростях распада ^{238}U и ^{235}U и ввиду постоянства изотопного отношения современного природного урана в подавляющем большинстве геологических объектов ($^{238}U/^{235}U$=137,88) имеется возможность вычислять значение возраста и по соотношению $^{207}Pb/^{206}Pb$.

Таким образом, применяя уран-торий-свинцовый метод, значение возраста исследуемого образца можно вычислить по четырем изотопным отношениям, три из которых являются независимыми. Это является большим преимуществом данного метода по сравнению с другими радиологическими методами, так как он позволяет оценить степень надежности получаемых значений возраста. Совпадение (конкордантность) значений, вычисленных по различным изотопным отношениям, свидетельствует о достоверности полученного возраста, так как все эти отношения связаны с различными рядами радиоактивного распада, различными промежуточными продуктами и их концентрациями и, следовательно, соответствие между ними является веским доказательством хорошей сохранности образца и надежности вычисленного значения возраста. Следует отметить, что ториевый ряд распада в силу методических сложностей используется значительно реже урановых.

Однако в многолетней практике датирования U-Th-Pb методом получение конкордантных значений является скорее исключением, чем правилом; в подавляющем большинстве случаев получаются несовпадающие (дискордантные) значения возраста.

Получение неискаженных, т.е. конкордантных значений возраста возможно только при выполнении следующих условий:

1) полной замкнутости исследуемой изотопно-геохронометрической системы элементов с момента образования геологического объекта до момента исследования (в данном случае совокупности изотопов ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th и ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb);

2) правильной оценке и учете «фонового» содержания дочернего элемента в момент образования объекта.

В U-Th-Pb методе выполнение последнего условия осуществляется введением поправки на первичный свинец (так называемый обыкновенный). Признаком и мерой присутствия обыкновенного свинца является содержание изотопа ^{204}Pb, который имеет нерадиогенное происхождение.

Степень искажающего воздействия такой поправки на вычисляемые значения возраста зависит от соотношения радиогенной и нерадиогенной долей свинца в минерале и от правильно выбранного изотопного состава обыкновенного свинца, на который вносится поправка.

Используемые для исследования собственно урановые минералы и прежде всего уранинит, настуран, браннерит нередко изменены наложенными процессами и метамиктизированы, что приводит к нарушению замкнутости изотопно-

геохронометрических систем. Практика показывает, что урановые минералы целесообразно использовать только при геохронологических исследованиях преимущественно фанерозойских пород и руд после детального их изучения. В то же время аналитические и методологические аспекты ограничивают применение U-Th-Pb метода по образцам породы в целом докембрийскими образованиями.

Наиболее широко для целей геохронологии во всем диапазоне геологического времени используются акцессорные урансодержащие минералы: монацит, циркон, сфен, ортит, пирохлор, апатит, а в последнее время и бадделеит (при датировании основных и ультраосновных пород).

Современные графоаналитические способы обработки результатов предполагают исследование группы из 5-8 и более когенетичных образцов, в том числе и различные фракции циркона, выделенного из одной пробы.

В качестве основного минерала-геохронометра U-Pb метода в настоящее время применяется циркон. Такое внимание к этому минералу несмотря на значительную трудоемкость выделения его мономинеральных фракций обусловлено тем, что циркон встречается практически во всех изверженных, осадочных и метаморфических породах, а его морфологические особенности хорошо коррелируются с составом и генезисом пород. Циркон хорошо противостоит разрушающему воздействию различных физико-химических процессов, содержит ощутимые количества U и Th, имеет, как правило, небольшие концентрации обыкновенного свинца и высокую устойчивость U-Pb системы к воздействию повышеной температуры.

Наиболее распространенным способом интерпретации значений возраста цирконов в настоящее время является модель Аренса-Везерилла, применяемая к группе когенетичных образцов и основанная на взаимосвязи значений возраста, вычисленных по изотопным отношениям «дочерний–материнский элемент» в радиоактивных рядах ^{238}U и ^{235}U. Графические построения выполняются на диаграмме в координатах $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ относительно кривой согласованных значений возраста (конкордии), являющейся геометрическим местом точек для образцов, у которых равны значения возраста по изотопным отношениям $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{285}U$.

Модель реализуется лишь при выполнении следующих условий: 1) все образцы циркона однозозрастны; 2) в процессе кристаллизации они захватили то или иное количество обыкновенного свинца, но непременно одного и того же изотопного состава; 3) нарушение замкнутости U-Pb системы всех образцов происходило при однократной одновременной эпизодической потере свинца и (или) урана или посредством привноса урана; 4) не было фракционирования изотопов урана и свинца в ходе процессов, нарушающих замкнутость U-Pb системы; 5) для всех образцов правильно сделана поправка на обыкновенный свинец.

Сопоставляя перечисленные условия с вполне вероятным воздействием на цирконы всевозможных наложенных процессов, можно сделать вывод, что вероятность реализации этой модели не велика и возможна лишь для ограниченного круга сравнительно простых ситуаций.

Для фанерозоя эти возможности значительно ограничены, поскольку для достижения той же достоверности требуется повышение точности всех аналитических процедур. Интерпретация результатов при этом возможна только на основе оценки степени конкордантности значений возраста, полученных по разным изотопным отношениям для одного циркона или для разных проб циркона одного и того же массива. Решающее значение здесь приобретает присутствие обыкновенного свинца в цирконе и, соответственно, необходимость вносить в него поправку.

Как уже указывалось, индикатором и мерой содержания обыкновенного свинца в цирконе является наличие в спектре масс изотопа ^{204}Pb, а степень его искажающего влияния зависит от соотношения радиогенной и нерадиогенной (обыкновенной) долей свинца в цирконе. Для характеристики этого соотношения обычно употребляется величина $^{206}Pb/^{204}Pb$, измеряемая при изотопном анализе свинца, выделенного из циркона. Сколько-нибудь достоверные вычисления возрастных значений возможны, начиная с изотопного отношения $^{206}Pb/^{204}Pb$ = 100-150 и чем больше оно (до нескольких тысяч), тем меньшее искажающее влияние оказывает нерадиогенная добавка.

Также представляет опасность для исследователей возможное нахождение в цирконах фанерозойских пород ксеногенной составляющей (например, в виде более древних ядер и реликтовых зерен), несущей более древний радиогенный свинец. Для предупреждения и устранения указанных причин возможных погрешностей проводится тщательное изучение всех проб цирконов с ручным отбором навески под бинокулярным микроскопом. Результаты изучения используются при интерпретации возрастных данных.

Однако даже при тщательном отборе циркона не может быть полностью исключено присутствие ксеногенной компоненты. В этом случае расположение фигуративных точек на диаграмме с конкордией будет определяться дискордией, проходящей через точки на конкордии, отвечающие возрасту объекта (циркона) и возрасту ксеногенной компоненты (т.е. дискордия, например, будет проходить через точки t_0 и t_1, но в этом случае t_1 – возраст породы, а t_0 – возраст ксеногенного циркона). Очевидно, что возрасты, рассчитанные по такой дискордии, будут отвечать истинным, если и ксеногенная компонента и циркон, образовавшийся при кристаллизации породы, оставались закрытыми системами в отношении U и Pb. В противном случае интерпретация результатов и доказательство истинности возраста резко усложняются.

Из вышесказанного следует, что наиболее достоверного результата можно добиться при получении конкордантных значений измеренных возрастов. Для этого используются некоторые лабораторные приемы, в частности для исключения гипергенных (современных) потерь свинца применяется метод жесткой обработки циркона HF. При этом происходит растворение метамиктной компоненты циркона, отвечающей за гипергенные потери свинца. В идеальном случае она может полностью раствориться, и нерастворимая фракция (НРФ) окажется полностью кристаллической и даст конкордантные значения возраста по всем отношениям. Используются также метод аэроабразии, а также разделение единой фракции циркона по плотности или магнитным свойствам, что может помочь в выявлении наименее дискордантных компонент циркона.

В практической работе используется то обстоятельство, что, как правило, ксеногенная добавка в цирконах значительно меньше основной его массы. В силу этого на диаграмме с конкордией точки, отвечающие проанализированным цирконам, располагаются в нижней части дискордии. При частичных потерях чаще всего (но не всегда) точки проанализированных цирконов располагаются в верхней части дискордии.

Комплексное использование изотопных методов. Рассмотрим некоторые аспекты комплексного использования изотопных методов. Каждый из изотопных методов имеет свои критерии соответствия полученных результатов времени реального геологического события. Для K-Ar метода – это совпадение измеренных возрастов различных минералов, для U-Pb – конкордантность возрастов, рассчитанных по всем трем изотопным отношениям, для Rb-Sr и Sm-Nd – получение изохронной зависимости (СКВО ≈ 1) при совпадении валовой датировки с минеральной. При равенстве возрастных значений, полученных для петрографически неизмененных магматических пород двумя или тремя методами, и выполнении указанных критериев возраст породы в абсолютном большинстве случаев определяется однозначно, т.к. такое совпадение указывает на отсутствие наложенных процессов либо на их недостаточную интенсивность, неспособную вызвать искажение изотопной системы даже наименее устойчивого геохронометра. Здесь же отметим, что совпадение результатов для всех геохронометров на уровне времени наложенного (неметаморфического) процесса при изучении магматических пород, сохранивших свой первичный облик, просто исключено. До сих пор такие случаи, и то предположительно, фиксировались только для метаморфических пород высокой степени метаморфизма. Правда, следует отметить, что в последнее время при исследовании вулканических пород наблюдаются примеры получения совпадающих результатов двух методов (но не трех!), фиксирующих время наложенного процесса. Однако такие случаи пока чрезвычайно редки (возможно, из-за редкости использования комплекса методов). Для метаморфических и особенно полиметаморфических пород такое совпадение вполне возможно, но геологический смысл полученного возраста не всегда ясен (какой из этапов метаморфизма фиксируется изотопными методами?).

Тем не менее в реальной геохронологической практике случаи идеального совпадения результатов встречаются далеко не часто, даже при качественном опробовании объекта исследования. При определенной интенсивности наложенных процессов в силу различной устойчивости разных геохронометров их «показания» начнут отличаться, и тем больше, чем больше интенсивность процесса. При этом характер дискордантности между методами определяется типом наложенного процесса.

Наиболее подробно изучено поведение изотопных систем в условиях сухого термического воздействия. В первую очередь оно сказывается на K-Ar системах, в абсолютном большинстве случаев приводя к потерям радиогенного аргона. Такое воздействие может привести и к потере радиогенного стронция из минералов, но радиус диффузии при реальных природных температу-

рах сравнительно невелик (первые сантиметры). Кроме того, радиогенный стронций, как правило, захватывается ближайшими минералами-акцепторами (плагиоклаз, апатит), в силу чего Rb-Sr система пород в целом оказывается замкнутой в объеме взятой пробы. U-Pb система цирконов и Sm-Nd система пород также весьма устойчивы при высоких температурах. Так, достаточно часто встречаются случаи сохранности U-Pb системы цирконов даже в условиях расплава, чем и определяется опасность присутствия ксеногенного циркона или его ядер в новообразованном магматическом цирконе.

Таким образом, при чисто температурном воздействии результаты K-Ar метода могут оказаться «омоложенными», вплоть до полной потери аргона на момент воздействия, в то время как возраст по циркону или изохронный Rb-Sr и Sm-Nd возрасты останутся неизменными.

Сухое тепловое воздействие относится к частному случаю наложенных процессов, т.к. оно часто сопровождается повышением подвижности летучих, способствующему ускоренной миграции радиогенных, а иногда и радиоактивных, изотопов. Такая миграция, сопровождаемая, естественно, и миграцией других элементов, как правило, приводит к видимым или микроскопическим изменениям. Именно поэтому главным критерием при отборе проб становится их петрографическая неизменность, ибо закономерности искажения изотопных систем измененных пород изучены недостаточно. В то же время иногда петрографическими методами трудно выявить изменения, вызванные наложенными процессами от автометасоматических преобразований. В подобных ситуациях именно изотопные методы способны определить тип изменений, т.к. автометасоматические процессы не должны влиять на измеряемый возраст.

Чаще всего геохронологические методы используются для слабоизмененных пород и здесь возможны различные ситуации. Как правило, в условиях низкотемпературных изменений наиболее устойчивой опять же оказываются Sm-Nd система пород и U-Pb система цирконов. Однако, если эти изменения не затронули, например, темноцветные минералы и воздействовали только на полевошпатовую составляющую породы, то K-Ar системы амфиболов и слюд могут оказаться более устойчивыми, а их измеренный возраст выше, чем изохронный Rb-Sr возраст. С такой ситуацией чаще всего можно столкнуться при датировании вулканитов, о чем раньше уже упоминалось. Но и при изучении интрузивных пород от такой опасности никто не застрахован. Нельзя сказать, что и цирконы совершенно не реагируют на такие процессы, о чем свидетельствует большое количество U-Pb дискордий, проходящих через ноль. При неоднократных низкотемпературных воздействиях может оказаться, что K-Ar системы амфиболов и слюд лучше сохраняют возрастную информацию, нежели все другие, однако такие случаи встречаются не очень часто.

Сказанное выше лишь иллюстрирует основное положение. При появлении разных по характеру природных воздействий возможна различная реакция на них используемых изотопных систем, приводящая к произвольной комбинации измеряемых возрастов, хотя вероятность искажения истинных возрастов этих систем различна. Наибольшая относится к K-Ar системам минералов, наименьшая – к U-Pb системам цирконов. Поэтому в тех довольно частых случаях, когда не удается получить совпадения результатов различных методов, необходимо проведение специальных дополнительных исследований. Они могут выливаться в построение внутренних U-Pb изохрон по различным фракциям циркона одной пробы или при использовании других U-содержащих акцессорных минералов либо в построение поли- и мономинеральных Rb-Sr изохрон, либо в привлечение к минералам метода $^{40}Ar/^{39}Ar$, либо в специальную обработку каменного материала (абразия цирконов или их дифференциальное растворение, кислотная обработка пород и минералов и т.п.). Возможно использование и других приемов. Цель таких исследований – выявление не затронутых влиянием наложенных процессов участков пород и минералов, анализ которых позволяет получить необходимые доказательства истинности возраста, хотя бы в рамках одного из методов.

Комплексное использование изотопных методов позволяет подойти к решению еще одного вопроса, очень важного для магматической геохронологии. Речь идет о длительности магматических процессов, в частности о времени становления магматических объектов, в том числе и многофазных интрузий и комплексов, развитых в Западной Якутии и изложенных в [4]. Специальное изучение этой проблемы по Восточной Якутии показало следующее.

Имеющаяся геохронологическая информация предполагает, что длительность формирования отдельной интрузивной фазы (от момента внедрения магмы до ее полной кристаллизации и охлаждения до температур ~300°C) не превышает

первые миллионы лет (максимум 10-15 млн.лет) для мезо- и гипабиссальных тел, в том числе и при их достаточно крупных размерах (с площадью выхода на поверхность тыс. км^2). Это означает, что при высокой точности измерений даже при соблюдении всех критериев достоверности каждого метода может фиксироваться слабая их дискордантность.

Для многофазных массивов и комплексов разница во времени образования между фазами не превышает 20 млн. лет. Таким образом, эта величина ограничивает возможную дискордантность показаний различных геохронометров при изучении разных фаз одного массива (естественно, при наличии внутренних доказательств реальности измеренных возрастов). Большая разница будет указывать либо на неправомочность отнесения пород к единому комплексу, либо на фиксацию одним из методов наложенного процесса.

Ниже следует остановиться и на вопросе возможного «удревнения» изотопными методами действительного возраста магматических объектов, что и фиксирует геологическая практика. В K-Ar методе это вызывается захватом так называемого «избыточного» радиогенного аргона различной природы. В U-Pb методе такое явление связано с присутствием не распознаваемого при минералогическом изучении ксеногенного циркона. В Rb-Sr методе это может быть обусловлено «первичным наклоном» изохроны в случае образования пород из материала субстрата с разным Rb/Sr отношением при отсутствии гомогенизации расплава. Аналогичная причина может, и с еще более высокой степенью вероятности, вызвать «удревнение» и в Sm-Nd системе. Однако различные геохимические свойства в парах K-Ar, U-Pb, Rb-Sr и разные причины данного эффекта для разных методов приводят к тому, что одинаковое «удревнение» по всем геохронометрам недостижимо. Поэтому в реальной ситуации кажущегося «удревнения» возраста соблюдение изотопных критериев достоверности для всех методов полностью исключается. Так, в силу установленной различной способности к захвату аргона разными минералами не может наблюдаться совпадение всех измеренных возрастов. Тем более нереально совпадение результатов при захвате аргона (газа) из магмы и ксеногенного циркона новообразованным минералом. Не будет при использовании Sm-Nd и Rb-Sr методов и совпадения валового и минерального изохронных возрастов и т.д. Строго говоря, если и существует слабая вероятность того, что комбинация условий «удревнения» и «омоложения» в рамках одного из методов случайно приведет к кажущейся надежности измеренного возраста на отличном от действительности уровне, то для разных методов эта же самая комбинация приведет к заведомо различным результатам. Все это также является причиной необходимости использования комплекса методов. В то же время подчеркнем еще раз, что в геохронологической практике случаи «удревнения» возраста встречаются несравненно реже, чем «омоложения» и каждый из них вызывает (должен вызывать) повышенное внимание специалистов.

Важен также вопрос сопоставления данных геологических наблюдений с результатами геохронологических исследований. В первую очередь он относится к случаю, когда «геохронологический» возраст оказывается древнее «геологического». Поскольку одинаковое «удревнение» по разным изотопным системам исключено, получение необходимых доказательств надежности «геохронологического» возраста должно с неизбежностью приводить к поискам причин ошибочности ранее сделанного геологического заключения. Обратная ситуация, когда «геохронологический» возраст моложе «геологического», возможна в двух случаях: либо изотопные данные фиксируют время наложенного процесса (если «геологический» возраст установлен вполне надежно), либо существующие геологические представления о времени образования объекта не корректны.

Выводы

Для надежного определения возраста магматитов Восточной Якутии оптимальный комплекс изотопных методов сводится к следующему:

1) для магматических пород мезозоя–кайнозоя может оказаться вполне достаточно K-Ar метода (и его модификации – метода $^{40}Ar/^{39}Ar$), естественно, при методологически корректном его использовании и исключении из практики анализа валовых (породных) проб. В первую очередь это относится к обязательному датированию нескольких минералов (не менее двух), из которых один должен быть достаточно устойчив к наложенным воздействиям (амфиболы, слюды). При этом количество проб на объект исследования (фаза массива, вулканический поток) должно составлять не менее двух. Однако в областях многократного проявления магматизма каждый реперный объект (петро- и стратотип)

для получения однозначных доказательств возраста должен датироваться комплексом методов (не менее двух);

2) использование Rb-Sr и Sm-Nd методов предполагает построение изохрон для валовых проб и минералов (полевые шпаты, слюды). Общее количество проб – не менее 6-7. Применение U-Pb метода требует анализа нескольких фракций циркона желательно также из двух-трех проб;

3) датирование палеозойских и более древних пород значительно сложнее, и применение U-Pb и (или) Rb-Sr и Sm-Nd методов обязательно. Отметим, что при исследовании пород кислого состава могут быть использованы все методы (кроме Sm-Nd, который в этом случае применим только к породам докембрийского возраста). При датировании умеренно-кислых и более основных пород должен быть исключен Rb-Sr метод в силу низких и слабоварьирующих отношений Rb/Sr.

Литература

1. *Геология* и рудоносность магматитов хребта Полоусного / В.А.Трунилина, Ю.С. Орлов, С.П. Роев и др. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1996. 132 с.

2. *Геология* СССР. Т.XXX. Северо-Восток СССР. Геологическое описание. Кн.2. М.: Недра, 1970. 536 с.

3. *Геология* Якутской АССР. М.: Недра, 1981. 300 с.

4. *Зайцев А.И.* Изотопная геохронология – ключ к решению геологических проблем Якутии // Вестник Госкомгеологии. Матер. по геол. и полезным ископаемым РС(Я). Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2001. № 1. С. 27-30.

5. *Ивенсен Ю.П., Амузинский В.А., Невойса Г.Г.* Строение, история развития, магматизм и металлогения северной части Верхоянской складчатой зоны. Новосибирск: Наука, 1975. 322 с.

6. *Ненашев Н.И.* Мезокайнозойский магматизм и рудообразование Восточной Якутии. М.: Наука, 1965. 169 с.

7. *Ненашев Н.И.* Магматизм и развитие рудно-магматических узлов Восточной Якутии. Новосибирск: Наука, 1979. 140 с.

8. *Ненашев Н.И., Зайцев А.И.* Эволюция мезозойского гранитоидного магматизма в Яно-Колымской складчатой области. Якутск, 1985. 176 с.

9. *Обосновать* выделение и разработать схему корреляции рифейско-палеозойских базитовых и щелочно-ультрабазитовых комплексов Восточной Якутии (Юдомская и Верхоянская серийные легенды) в целях совершествования серийных легенд к Госгеолкартам-200 и –1000/3 / Е.Е.Порошин, А.П.Кропачев, А.Г.Рублев и др. // Ежегодник ВСЕГЕИ. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2001. С. 32-34.

10. *Трунилина В.А.* Геология и рудоносность позднемезозойских магматических образований северо-востока Якутии. Новосибирск: Наука, 1992. 257 с.

11. *Трунилина В.А., Роев С.П.* Позднемезозойский магматизм Селенняхского кряжа. Якутск, 1988. 162 с.