***Критерии достоверности результатов геохронологических определений.***

Достоверность получаемой информации обеспечивается следующими главными параметрами.

*1. Качество результатов аналитических работ.*

Объективные цифровые изотопно-геохимические и геохронологические аналитические данные, отражающие происхождение, абсолютный возраст и характер преобразований горных пород, руд и минералов, должны быть получены в аттестованной лаборатории по сертифицированным методикам и на зарегистрированном в Росреестре оборудовании. ЦИИ ФГУП «ВСЕГЕИ» - единственный среди изотопных лабораторий природоресурсного комплекса РФ обладает соответствующим аттестатом Госстандарта и Росаккредитации, его оборудование имеет регистрацию в Росреестре. Только такой подход делает полученные результаты ***международно-значимыми и легитимными***. Это необходимое условие для признания правильности получаемой стратегической геологической информации.

*2. Правильность использования аналитических данных при интерпретационных построениях.*

Несмотря на объективную правильность получаемых результатов (физических параметров), для повышения надежности геологических рекомендаций необходимо отфильтровывать информацию, недостаточно подтвержденную статистически или случайную. Это относится также и к информации о первичных (исходных) геологических объектах, затронутых вторичными процессами, если невозможно количественно оценить и учесть вклад одного или нескольких наложенных событий.

Наиболее характерным примером этого может служить самый распространенный способ оценки вклада различных источников сноса в состав формирующейся терригенной осадочной породы. При статистически рекомендуемом количестве датируемых детритовых цирконов в 60-100 единиц, данные об абсолютном возрасте источника(ов), подтвержденные только 2-3 зернами и менее – рассматриваются только как вероятные. Они имеют ***низкую геологическую значимость*** – по причине возможной контаминации, флюктуационных эффектов и т.п. Тем не менее, в итоговых отчетах должны фигурировать все без исключения результаты аналитических работ. Наиболее эффективно разбраковку аналитических данных могут выполнять только специалисты, имеющие опыт работы в изотопных лабораториях.

Кроме того, при проведении интерпретации геохронологических данных, полученных по акцессорному циркону, необходимо принимать во внимание, что чрезвычайно устойчивая минеральная структура циркона и высокая локальность применяемых методов, позволяют находить и датировать отдельные древнейшие зерна, присутствие которых указывают на:

(1) для кислых магматических пород – возраст их протолита;

(2) для пелагических илов – присутствие древних пород в региональном контексте;

(3) для базитовых магматических пород – свидетельство ассимиляции нижележащих пород;

(4) для осадочных пород – возраст их древнейших источников.

*3. Достаточность и полнота аналитических данных.*

Для выработки адекватных рекомендаций необходимо располагать представительной базой данных по геохронологическим характеристикам различных типов пород и проводить тщательный отбор по критериям пригодности.

Следует отметить, что в результате изучения геохронологических данных были обоснованы и применены ***критерии достоверности***, основанные на следующих положениях.

1. *Подлежат исключению любые данные по образцам валов (пород в целом) K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd*, поскольку получаемые по валовым образцам псевдоизохроны в 90% являются линиями смешения не имеющими геохронологического смысла. Многочисленные исследования закономерностей диффузии Ar в кристаллической структуре минералов показали, что они по-разному удерживают радиогенный Ar. Этот параметр отражается энергией активации диффузии (температурой закрытия изотопной системы в минерале) – температуры, ниже которой не происходит потерь радиогенного Ar. Наибольшие температуры закрытия у таких минералов как биотит, амфибол и санидин, около 450 С. У других минералов – гораздо ниже 200-250 С, и расчетные значения возраста оказываются занижены за счет потерь Ar за геологическое время.
2. *Изохронные зависимости считаются значимыми при величине среднеквадратического взвешенного отклонения (СКВО) не более 2-3.* С математической точки зрения, формально величина СКВО <1 означает, что линию регрессии (изохрону) можно провести через области аналитических неопределенностей всех аналитических точек (в данном случае – минералов породы) и такая линия регрессии является значимой, т.е. ее наклон определяется возрастом породы. Вторичные изменения минералов приводят к тому, что во многих случаях не удается провести линию регрессии через области аналитической неопределенности всех точек, и СКВО > 1. Однако небольшой «отскок» точек мало влияет на изменение угла наклоны изохронны, реально при СКВО < 2 – 3.
3. *При U-Pb датировании цирконов значимым является конкордантный возрастной кластер не менее чем по 7-9 единичным кристаллам или их отдельным зонам роста.* Меньшее число точек является не представительным, возможно, случайным результатом, и статистические методы не позволяют корректно анализировать выборку менее чем из 7 наблюдений.
4. *При анализе субконкордантных кластеров значимыми приняты оценки возраста с величиной СКВО < 2-3 и вероятностью конкордантности не хуже 0,3-0,5.* По СКВО см. п.2. Параметр вероятности конкордантности показывает насколько точно расчетный параметр соответствует положению аналитических точек на конкордии, и в идеале равен единице. При величине этого параметра менее 0,3 -0,5 формально кластер, по которому произведен расчет, не принадлежит конкордии, следовательно, расчетная оценка возраста отягощена систематической погрешностью.
5. *При получении серии субконкордантных кластеров в эндогенных породах данные не учитываются, если не приведено четких морфологических, геохимических и изотопных доказательств различия цирконов в различных кластерах.*
6. *В случае получения дискордии, ее верхнее и нижнее пересечения считаются значимыми, если есть не менее 5 точек у каждого из пересечений, т.е. со значениями дискордантности 0 – 25% и 70-90% соответственно.* Параметр дискордантности индивидуальной аналитической точки определяет ее положение на дискордии. Если эта величина составляет 0%, то точки конкордантны у верхнего пересечения, т.е. цирконы не испытали потерь свинца. Чем большее количество свинца было потеряно цирконами, тем это параметр больше: цирконы, потерявшие весь радиогенный свинец, при наложенном воздействии находятся на нижнем пересечении дискордии с конкордией и имеют дискордантность 100%. Как правило, большинство аналитических точек тяготеют к верхнему пересечению с конкордией. В этом случае нижнее пересечение отягощено большой ошибкой и не принимается во внимание. Значимое нижнее пересечение с дискордией можно получить, если имеются аналитические точки с дискордантностью более 70% (рис. 1, 2).

Рис.1. Пример значимой дискордии: есть субконкордантные точки у верхнего и у нижнего пересечений.

Рис.2. Пример не значимой дискордии: нет субконкордантных точек.

1. *В случае значимых обратно-дискордантных точек, полученная оценка возраста отбраковывается.* Потери свинца при наложенном процессе приводят к тому, что аналитические точки попадают в область ниже конкордии. Однако в ряде случаев наблюдаются точки выше конкордии. Формально это означает, что из цирконов преимущественно выносился уран, а не свинец, что невозможно при диффузионных потерях за счет нагрева. Такая ситуация встречается в случае трещиноватых цирконов, испытавших гипергенные изменения, когда возможен вынос урана по трещинам в низкотемпературных условиях. Но в этом случае теряется и свинец, и модельное построение Аренса Везерилла (график с конкордией) теряет смысл, поскольку в его основе заложена модель термических потерь за счет диффузии, что возможно для радиогенного свинца, но исключено для урана, как элемента, изоморфно входящего в катионную группу циркона. Поэтому расчет возраста по обратно – конкордантным точкам некорректен и отягощен большой систематической ошибкой.
2. *В случае прямой или обратной дискордантности менее 1-3%* значимыми являются оценки по верхнему пересечению с дискордией (рис. 3, 4).

Рис. 3. Пример субконкордантных точек с прямой дискордантностью: в качестве оценки возраста берется расчетное верхнее пересечение с конкордией.

Рис.4. Пример субконкордантных точек с обратной дискордантностью: в качестве оценки возраста берется расчетное верхнее пересечение с конкордией.

1. *В случае детритовых цирконов из осадочных пород, возраст породы указывается как моложе возраста самого молодого циркона: T < nnn млн.лет.* Детритовые цирконы находятся в терригенной фракции осадочных пород, которая является продуктом выветривания коренных эндогенных пород, которые по определению древнее новообразованной осадочной. Как правило, осадочная порода содержит терригенную составляющую из множественных коренных источников самого разнообразного возраста, соответственно и детритовые цирконы различного возраста. Самые молодые из них указывают на верхнюю возрастную границу формирования осадка.
2. *В случае цирконов из метаморфических пород принимаются значения возраста протолита по ядрам, и метаморфизма по оболочкам.* Если измеренный возраст по ядрам в пределах ошибки не отличим от возраста оболочек, в базу заносится значение возраста протолита древнее возраста метаморфических оболочек: T > nnn млн.лет.
3. *Для определения соответствия получаемой возрастной оценки по изохронным методам (Rb-Sr, Sm-Nd) этапу кристаллизации магматической породы*, или этапу ее метаморфической переработки необходимо осуществить анализ минеральной ассоциации, по которой было осуществлено датирование.

Если в ассоциации присутствуют типичные минералы метаморфических пород, например, гранат, или амфиболы по пироксенам, то дается оценка возраста этапа метаморфизма, т.е. возраст образования исходной породы древнее полученной цифры возраста: Т > nnn млн.лет (табл. 1, рис. 5, 6, 7).



Рис. 5. Пример Sm-Nd датирования метаморфических пород (гранатовых амфиболитов) Центральной Карелии. Изохронна значимая, поскольку СКВО <1



Рис. 6. Возраст кристаллических сланцев, полученный **Sm-Nd** методом



Рис. 7. Пример Sm-Nd датирования гранат-силлиманитовых кристаллосланцев. Гиперстен сильно изменен, поэтому общая изохронна (красный пунктир) обладает огромным СКВО и лишена смысла. Исключение гиперстена из построения позволило получить значимую изохрону (синяя линия) со СКВО<< 1.

 Приведенные выше примеры датирования метаморфических ассоциаций минералов позволили получить возраст метаморфического события, следовательно сами породы (протолит) древнее, т.е. возраст пород T > T метаморфизма, представленного на графиках.

1. *При интерпретации данных метода 40Ar-39Ar принимаются во внимание возрастные спектры с «плато»,* отвечающему проценту выхода аргона не менее чем от 50 до 100%, значения по промежуточным «плато», когда есть более высокие значения возраста по высокотемпературной области спектра с выходом аргона от 70 до 100% не учитываются, поскольку соответствуют участкам минерала с частичными потерями радиогенного аргона (рис. 8, 9).



Рис. 8. 40Ar-39Ar датирование кимберлита с флогопитом (куонамский комплекс, R-49).



Рис. 9 . 40Ar-39Ar датирование кимберлита с флогопитом (куонамский комплекс, R-49).

 Следует отметить, что на рисунке 10 приведены отрицательные (а, б) и положительные (в, г) примеры определения интегрального возраста г.п., рассчитанного по методу плато.



Рис. 10. Результаты Ar/Ar датировок роговых обманок (а-б) –плохие и биотита (в) из метабазитов и биотита из метапелитов широкинской серии (г) -хорошие. Для каждого образца приведен интегральный возраст; стрелками показан возраст, рассчитанный по методу плато. (Источник данных: И.И. Лиханов/ Геохимия, генезис и возраст метаморфизма пород Приангарья в зоне сочленения северного и южного Енисейского кряжа/ Геохимия, 2016, Н.2 )

1. *Критерии «зараженности» пробы молодыми цирконами следующие:* присутствие древнего конкордантного кластера по цирконам с характерной внутренней зональностью, при наличии небольшого количества молодых датировок по цирконам с резко отличным габитусом и внутренним строением (рис. 11, 12).



 Рис. 11. Общий возрастной спектр цирконов из докембрийского амфиболита.

 Рис. 12. Фанерозойский возрастной кластер 320 -400 млн.лет.

***Критерии для методов, не использующихся в ЦИИ ВСЕГЕИ, следующие.***

1. *Не учитываются изохронные оценки возраста, если расчет по различным минералам породы приводит к значимо различным результатам.*
2. *Не учитываются «эррохроны», т.е. псевдоизохроны с величиной СКВО > 10.* При величине СКВО > 10 аналитические точки располагаются в виде облака, и построение регрессии (изохронны) является бессмысленным. Формальные оценки возраста не имеют геологического смысла, хотя публикуются в ряде статей.
3. *Не учитываются данные по монацитам, полученные полуколичественным методом CHEM.* Метод CHEM не является изотопным методом датирования, выполняется микрозондовое определение концентрации урана и свинца, на основе чего рассчитывается возраст при условии, что монацит не захватил свинец при кристаллизации. В реальности это не так, поэтому такие оценки возраста являются систематически завышенными. Этот метод был предложен за рубежом более 10 лет тому назад, однако, от него практически отказались, поскольку в последнее время изотопные приборы типа SHRIMP стали гораздо доступнее.
4. *Не учитываются никакие расчеты модельного возраста по Sr, Nd, Hf, Os.* Модельный возраст рассчитывается исходя из одно- или двустадийной модели магматической дифференциации вещества из пород верхней деплетированной мантии. Он дает некую приблизительную оценку времени глубинной дифференциации в данном регионе, и к возрасту образовании магматической, а уж тем более метаморфической породы никакого отношения не имеет.
5. *Не учитываются данные по детритовым цирконам из зон надвигов, меланжа и тп.* В зонах надвигов, меланжа, сутурных зон, на одном уровне тектонически совмещены самые разновозрастные эндогенные и осадочные породы. Геохронологическая информация по такой смеси бессмысленна, хотя такие данные публикуются с попытками интерпретации того, какие комплексы пород могли участвовать в тектонических процессах.
6. *Датировки методом ID-TIMS считаются значимыми при наличии не менее 5-6 аналитических точек при условии наличия хотя бы одной конкордантной.* (рис. 13).



 Рис. 13. Датировки методом ID-TIMS, бадделеиты. (Степанова и др., ИГГД РАН, 2016)

1. *Для четвертичных пород данные по радиоуглеродному методу, ОСЛ и неравновесию урановых рядов учитываются при погрешности изменения менее 20%.* В последние 10 лет активно развивается метод определения 14С на ускорительных масс-спектрометрах (ams). Преимуществом метода является простая пробоподготовка (изготовление углеродных мишеней на стекле), высокая чувствительность и большая точность анализа. Для классического старого метода (С14) требуется не менее нескольких десятков граммов органических остатков (прежде всего древесины), а для АМС – всего несколько миллиграммов, т.е. возможно датирование остатков мхов, лишайников, фрагментов листьев и т.п. Поэтому при занесении в базу указывалось каким методом, 14С или 14С ams была сделана датировка.
2. *При изучении возраста четвертичных пород следует учитывать, что метод U-Th* датирования дает оптимальные результаты определения на возрастной шкале шкале 10 – 70 тыс.лет и применяется, главным образом, для морских илов.
3. *Отбраковываются геохронологических данных, полученные методом SIS*.

Метод датирования 87Sr/86Sr (SIS) основан на сопоставлении измеренного отношения изотопов стронция в осадочных карбонатах или раковинах с предполагаемой линией эволюции изотопного состава стронция в мировом океане. Это *не абсолютный изотопный метод датирования*, а метод корреляции наблюдаемых параметров с модельным параметром. Результаты этого метода **не могут** учитываться как достоверные в силу ряда причин:

1. Кривая эволюции изотопного состава стронция в мировом океане существенно отлична по данным различных авторов;

2. Нет четких критериев принадлежности осадочных пород и остатков раковин в них к открытым бассейнам осадконакопления в которых изотопный состав стронция соответствует таковому в мировом океане. В замкнутых бассейнах и даже частично изолированных (например, Ботнический залив Балтийского моря, Гудзонов залив и др.) изотопный состав стронция значимо более радиогенный, чем в океанической воде того же времени. Это является причиной больших неопределенностей и систематических ошибок оценки возраста осадконакопления. Оценки солености бассейна для обоснования его открытости или замкнутости выполняются обычно посредством анализа содержания стронция в раковинах моллюсков с сопоставлением с современными морскими моллюсками, что также сопряжено с рядом допущений и неопредленностей;

3. Постседиментационные (диагенетические и пост диагенетические) изменения осадочных пород под воздействием низкотемпературных флюидов приводят к существенному изменению величины изотопного отношения 87S/86Sr (обычно в сторону более радиогенного состава). Оценка факта и степени таких изменений обычно осуществляется с использованием геохимических данных: относительных концентраций Mg, Fe и Mn, а также данных об изотопном составе кислорода в карбонатах, также не является надежной.

Учитывая вышеизложенное, ***SIS метод не может рассматриваться как надежный изотопный метод датирования горных пород***.