

## АБСОЛЮТНОЕ ДАТИРОВАНИЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ - СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*В.С. Шейнкман*

### Введение

Несмотря на имеющиеся достижения в области возрастной диагностики горных пород и слагаемых ими образований, ситуация на поприще абсолютного датирования геологических объектов остается непростой. Недавно одним известным российским исследователем после анализа ситуации с датированием горных пород во введении к его хорошо обоснованной с геологических позиций работе весьма эмоционально было высказано следующее замечание: «Автор данной статьи не является специалистом по методам абсолютной геохронологии. Совсем, даже, наоборот.... Нижеследующий текст, поэтому, следует рассматривать как отчаянную попытку разобраться во всей той физико-химической зауми, при помощи которой к нашим любимым кембриям и ордовикам «привешивают» абсолютные датировки».

Не имеет значения, кто автор приведенных строк - подобное могли бы озвучить многие исследователи, поскольку в этом эмоциональном высказывании отображена суть того положения, которое сложилось в науке в области геохронометрии. Особенно в отечественной науке, поскольку в России ситуация осложнена и тем, что большой урон аналитической базе геологических исследований был нанесен в 1990-е гг., когда много лабораторий возрастной диагностики было закрыто и до сих пор не восстановлено.

В принципе высказывание, подобное приведенному, может быть отнесено к любому отрезку геологической истории. В нашем случае оно всецело затрагивает область четвертичных исследований, одной из весьма острых и актуальных проблем которых сегодня является абсолютное датирование изучаемых комплексов. Тем более что на основе временной привязки этих комплексов экстраполируется тренд и строится прогноз развития окружающей среды, а от степени детализации и надежности выявления событий плейстоцена зависит верность проводимых построений.

Приходится признать, что в России с инструментами возрастной диагностики образований четвертичного периода действительно положение сложилось особенно непростое. Ибо наряду с отмеченным сокращением аналитических исследований и нелегкой ситуацией в плане их поддержания на современном уровне немалую роль играет еще и географический фактор - к сложностям проведения работы организационного характера здесь добавляется необходимость ее осуществления часто в труднодоступных малоосвоенных районах Сибири. Это требует больших затрат средств и труда на пробоотбор, и у исследователей, естественно, складывается особое, ревностное отношение к отобранным образцам, ибо они для них имеют релевантный характер, поскольку повторить их отбор в случае необходимости часто бывает невозможно. Кроме того, значительная часть территории Сибири занята горными сооружениями, а плейстоценовые комплексы во многих случаях представлены мерзлыми толщами, что при применении к ним инструментов возрастной диагностики требует разработки специальных подходов.

В результате нередко возникает патовая ситуация. С одной стороны, поскольку на экстраполяции данных абсолютного датирования четвертичных комплексов проводится реконструкция хода развития окружающей среды и создается основа ее прогностики, такие материалы крайне необходимы, и исследователи тратят на их получение изрядные

усилия и средства. С другой стороны, получить сегодня в требуемом объеме надежные данные возрастной диагностики для значительной части изучаемых объектов крайне трудно - как физически, так и в плане недостаточной разработки методической базы.

Хотелось бы подчеркнуть, что применительно к геологическим исследованиям основа целого ряда теоретических и практических отечественных разработок в области абсолютного датирования четвертичных пород была заложена намного раньше, чем за рубежом. В частности, это касается наиболее перспективного, на наш взгляд, термолюминесцентного (ТЛ) датирования, которое было хорошо обосновано с базовых позиций российскими физиками еще в 1960-е гг. [*Фок, 1964; Антонов-Романовский, 1966; Физическая энциклопедия, 1990*] и впервые в геологических исследованиях было применено именно в бывшем СССР. Уже в конце 1960-х гг. пионерные лаборатории такого рода параллельно были созданы в Москве и Киеве [*Морозов, 1968; Шелкоплас, 1974; Шлюков и др., 1990; Morosov, 1968*]. В 1980-е гг. их сеть стала существенно расширяться, включая создание лабораторий в Сибири, но в 1990-е гг. практически все они были закрыты, и только сейчас началось восстановление утраченных позиций [*Шейнкман и др., 2009; Шейнкман, Мельников, 2011*].

Если взглянуть на коренную суть проблемы, она будет состоять в том, что методы, традиционно применяемые для датирования плейстоценовых образований, имеют узкий диапазон охвата и в отношении набора датируемых объектов, и в отношении временного интервала изучаемых событий. Для возрастной диагностики значительной части четвертичных комплексов большинство методов просто непригодно, и, кроме того, среди применяемых способов определения абсолютного возраста горных пород далеко не все методы хорошо отработаны. В результате многие изучаемые толщи в возрастном отношении оказываются или «немыми», или полученные по ним датировки носят единичный и противоречивый характер, из-за чего даже появляются радикальные призывы прекратить датирование тем или иным методом, поскольку его результаты не устраивают определенного автора.

Другой крайностью является то, что порой исследователи, не вникая в суть проблемы и не обращая внимания на необходимость учета особенностей работы соответствующим методом в условиях конкретных регионов, начинают слепо копировать и внедрять зарубежные технологии, далеко не всегда приемлемые в ситуации, присущей таким регионам. Особенно это касается Сибири, большая часть территории которой относится к области многолетнемерзлых пород (ММП), причем в изрядной части приуроченных к горным территориям, что требует при датировании четвертичных образований детально учитывать специфику формирования изучаемых комплексов.

Нужно сказать и об определенном информационном голоде, имеющем место в России в данной области знаний. Последний всесторонний обзор по проблеме датирования четвертичных образований, выполненный российскими исследователями, был опубликован четверть века назад в [*Руководство..., 1987*]. Лишь недавно по этой тематике в издательстве «Техносфера» вышел в свет на русском языке перевод книги Гюнтера Вагнера [2006], опубликованной в 1995 на немецком языке, и переведенной в 1998 г. на английский язык [*Wagner, 1998*]. Безусловно, этого крайне мало. Тем более что, хотя упомянутая монография Г.А. Вагнера это добротное исследование, в нем отсутствует анализ результатов российских авторов, за исключением двух разделов, касающихся дендрохронологии, в приложении к русскоязычному изданию [*Вагнер, 2006*]. Еще один, третий раздел приложения - о технологии УМС-AMS (ускоренной масс-спектрометрии - accelerator mass spectrometry) - написан В.А. Величко, но он ныне является гражданином Австралии и тоже не касается исследований в России. Главное же то, что материалы к основной монографии Г.А. Вагнера собирались в конце 1980-х - начале 1990-х гг., так что на момент выхода в свет русскоязычного издания этой монографии [*Вагнер, 2006*] многие из включенных в нее данных значительно устарели. Кроме того, перевод текста в ней иногда буквален и порой сделан без учета того, что на русском языке понятийный аппарат озвучивается по-иному, что затрудняет восприятие материала.

Из последних изданий весьма полезна вышедшая в 2005 г. в издательстве «Wiley» монография известного исследователя квартера Майка Уолкера [*Walker, 2005*], которая ныне активно распространяется в англоязычном варианте среди специалистов в области четвертичной геологии. В ограниченном объеме распространяется она в англоязычном варианте и в России - перевод ее на русский язык пока не планируется, и, повторим, всего этого крайне мало.

Для сравнения ситуации можно привести данные о том, что публикуется за рубежом. Геологическая служба США, например, регулярно, раз в несколько лет, публикует обширные отчеты с детальным обзором ведущих специалистов этой страны о последних достижениях в области датирования горных пород, причем эти отчеты на правах монографии свободно распространяются во всех странах. Регулярно публикуются на английском языке и многие иные, помимо упомянутой работы [*Walker, 2005*], обзоры подобного характера [*Dating Quaternary Sediments..., 1988; Luminescence and ESR dating..., 1997; Dating and earthquakes: review ..., 1998; Liritzis, 2000*]. Учитывая, что в России отмеченные издания для широкого круга исследователей далеко не всегда доступны, отечественное информационное поле в этом плане, на фоне крайне малого количества переводной литературы, тем более выглядит явно ненасыщенным, и подобная нехватка необходимой информации тоже мешает развитию датирования и применению новых методик.

Нужно также отметить, что наряду с методическими ограничениями, обусловленными рамками собственно геохронометрических технологий, правильной интерпретации данных мешает недостаток, а порой и просто отсутствие взаимодействия между пользователями результатами датирования и его исполнителями. В целом при любых видах датирования горных пород в их развитии выделяют определенный процесс, в котором выявляется и анализируется компонента, правомочная, с позиций физико-химической сути этого процесса, интерполироваться как временной критерий. Однако специалисты, непосредственно изучающие этот процесс, не всегда учитывают особенности геологических явлений, вносящих существенные коррективы в ход выделенной временной составляющей, а пользователи результатами датирования - не всегда вникают в суть геохронометрических технологий, чтобы внести необходимые поправки для соответствующей корректировки временного критерия. Причем со стороны пользователей нередко проявление некоторой легкости в отношении к правилам отбора и хранения образцов, хотя эти правила могут быть очень строгими, особенно у новых методов датирования, в которых в качестве вещества-таймера часто исследуется материал с весьма высокой чувствительностью к внешнему воздействию.

В сложившейся ситуации, с какими бы сложностями не было связано освоение и применение технологий абсолютного датирования четвертичных комплексов, реальные результаты будут возможны только тогда, когда пользователи ими будут вникать в суть технологий, а их разработчики - осознавать ход используемых как временной критерий процессов, протекающих в горных породах. Другого выхода нет, тем более что в области датирования четвертичных пород специалистов в России ныне крайне мало.

Исходя именно из такой постановки вопроса, автор, изучая четвертичные явления, освоил необходимые для их полноценного исследования методики датирования, и, накопив уже многолетний опыт в этой области, параллельно с непосредственным изучением плейстоценовых отложений занимается в настоящее время и поиском альтернативных существующим решений проблемы их возрастной диагностики. И, поскольку автор сам участвовал в создании новых разработок и продолжает проводить исследования в этой области, в предлагаемой статье освещаются, также, те из разработок такого рода, по которым уже в разных районах имеется опыт применения с положительными результатами.

В целом настоящая статья подготовлена как результат работы, проведенной автором по поручению Комиссии по изучению четвертичного периода РАН, по генерализации как ранее опубликованные автором блоки данных, так и недавно

обобщенной им информации. В том числе в аспекте тех вопросов, что были затронуты на последнем конгрессе INQUA (Bern, 2011) и на 7 Всероссийском совещании по изучению четвертичного периода (Апатиты, 2011). В статью включены все имеющиеся на сегодня результаты сделанного автором анализа ситуации, освещается суть и опыт применения существующих сегодня методов датирования образований плейстоцена и проводится оценка перспектив использования различных средств возрастной диагностики в четвертичных исследованиях. Особый акцент сделан при этом на приемлемости в Сибири соответствующих технологий датирования четвертичных отложений.

### Технологии датирования и их суть

На сегодня сутью основных геохронометрических технологий является анализ присущего многим горным породам свойства радиоактивности и изучение сопутствующих ей процессов. Опосредованные методики, опирающиеся на иные свойства горных пород, работают весьма избирательно, хотя, порой, также дают неплохие результаты. Например, это можно сказать о варво-циклитном анализе, опирающемся на математическое моделирование процесса седиментации при участии тонкодисперсных отложений. Первоначально метод был назван нано-циклитным анализом [Афанасьев, 1987]. Но, в силу того что префикс «нано» сегодня озвучивается в ином смысле, вместо него в освещаемых автором исследованиях [Шейнкман и др., 2009; Шейнкман, Мельников, 2011; Sheinkman, 2011] стал использоваться префикс «варво», который более точно отражает смысл данной методики, поскольку в ней анализируется соотношение толщин ленточных отложений. Будучи активно используемым в Сибири в 1980-х - начале 1990-х гг. [Афанасьев, Архипов, 1990], после начавшегося затем резкого спада четвертичных исследований в России метод оказался как-то забыт. Хотя об оправданности его применения речь шла на многих конференциях по изучению квартера. В частности, на 3 Всесоюзном совещании по изучению четвертичного периода (Таллинн, 1990) было даже предложено сделать этот метод способом геохронологического контроля в спорных ситуациях. Автором, например, с помощью варво-циклитного анализа совместно с С.Л. Афанасьевым был получен ряд важных возрастных определений для контроля ТЛ датировок на Алтае [Шейнкман, 2002; Sheinkman, 2011].

Можно привести и другие примеры в свое время неплохо зарекомендовавших себя, но ныне редко применяемых в России методов. К сожалению, их носители сегодня нередко имеют преклонный возраст и отходят от дел, а новое поколение исследователей пока не всегда в состоянии воспринимать методики подобного рода. Поэтому будем делать акцент на известных, широко применяемых сегодня, методах и тех видах возрастной диагностики четвертичных образований, перспектива внедрения которых в России реальна и может принести пользу в ближайшем будущем.

Касательно технологий, опирающихся на изучение в горных породах свойств радиоактивности нужно, прежде всего, сказать о специфике восприятия выявляемой с их помощью временной компоненты. Эта специфика заключается в том, что анализ данной компоненты может осуществляться принципиально разными способами, что влечет за собой, соответственно, применение различных, причем кардинально, правил отбора, транспортировки и хранения образцов (рис. 1).

Иными словами, используя единую суть - явление радиоактивности, - основные методы возрастной диагностики горных пород отличаются друг от друга не только по принципу датирования, но и по технике его исполнения и правилам отбора необходимых для датирования образцов. На основании этих различий все методы можно объединить (рис. 1) в две группы - *радиометрических и дозиметрических технологий*.

Методы, представленные в первой группе, используют явление радиоактивности, фиксируя следствие *радиации - излучения определенного радионуклида, выделенного в изучаемой породе в качестве таймера* посредством учета его радиоактивного распада. Отсюда название - *технологии радиометрического датирования*. Тогда как методы,

представленные во второй группе, используют явление радиоактивности как бы наоборот, фиксируя *иррадиацию - облучение определенных минералов*. В этом случае учитывается не радиоактивный распад радионуклидов, а *приобретение минералами новых свойств в результате поглощения ими некоторой дозы радиации*, излученной теми радионуклидами, что в той или иной мере практически всегда присутствуют в горных породах. Отсюда название: *дозиметрические методы*.

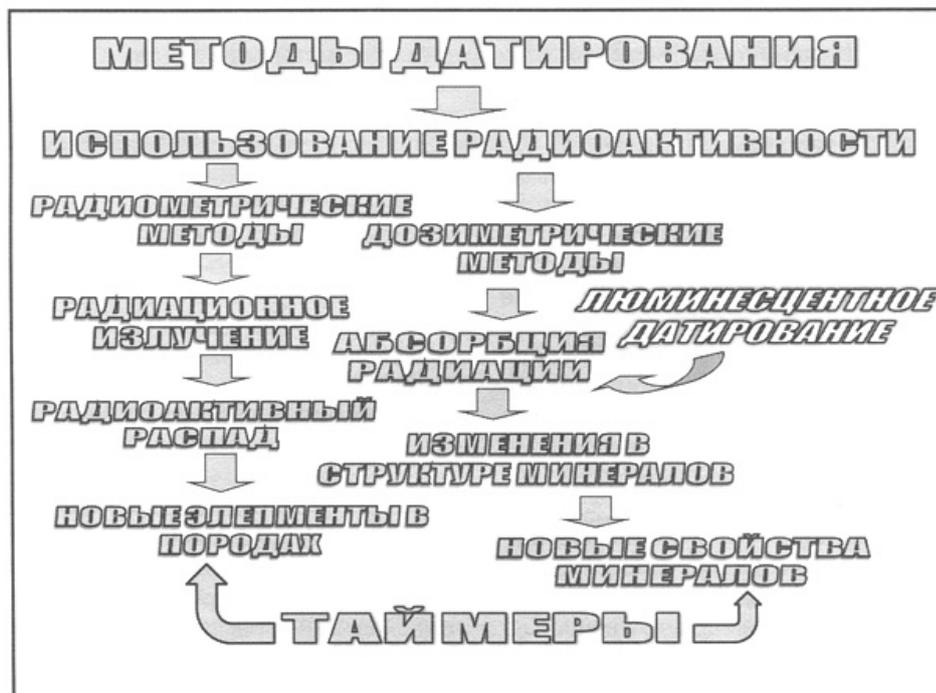


Рис. 1. Схема соподчиненности методов абсолютного датирования горных пород и используемых ими свойств радиоактивности

К сожалению, исследователями, желающими получить оценку возраста изучаемых ими толщ как можно быстрее и проще, отмеченная специфика осознается далеко не всегда, что вносит путаницу в изложение ими материала и непонимание коллег. Поэтому сначала кратко остановимся на сути основных, использующих свойство радиоактивности, технологий датирования, сделав акцент на тех из них, что с позиций накопленного на сегодня опыта наиболее приемлемы при проведении четвертичных исследований и подчеркнув, какие моменты при этом крайне важно осознать. Опыт использования методов радиометрического датирования более длительный, поэтому начнем с них.

### Методы радиометрического датирования

Представленные в данной группе методы, используя явление радиоактивности и фиксируя следствие излучения определенного радионуклида, выделенного в изучаемой породе в качестве таймера, опираются, как было отмечено выше, на учет последствий радиоактивного распада этого радионуклида. Главным технологическим требованием в данном случае является нахождение радионуклида-таймера в исследуемой породе как в закрытой системе, не позволяющей ему, в силу собственных особенностей развития породы, подвергаться воздействию извне. Т.е. - чтобы с момента появления радионуклида-таймера в исследуемой горной породе в процесс не вмешивались посторонние факторы, которые нарушали бы строгость учета результатов радиоактивного распада. Если эти правила соблюдены, то соотношение материнских и дочерних элементов в образце исследуемой породы - итог радиоактивного распада радионуклида-таймера - может быть интерпретировано как критерий времени нахождения этого таймера в изучаемом объекте.

Нужно сразу отметить, что, хотя впервые радиометрическое датирование было применено Эрнестом Резерфордом еще в начале XX столетия и ныне считается наиболее надежным способом возрастной диагностики горных пород, даже полученные таким образом результаты порой вызывают острые дискуссии. Причина в том, что в исследуемых породах нечасто встречаются содержащие радионуклид-таймер системы, которые удовлетворяли бы правилу их закрытости. В силу чего, несмотря на наличие во многих объектах теоретически пригодных для датирования различных радионуклидов, их использование из-за встречающихся нарушений закрытости отмеченных систем оказалось жестко ограничено. Ибо только в идеале используемые радиоактивные элементы из рассматриваемой системы не вымываются и не улетучиваются, а уменьшение их количества происходит только за счет радиоактивного распада, все продукты которого остаются внутри данной системы.

В природе такие идеальные ситуации практически не встречаются, и при использовании выбранного радионуклида-таймера лишь подразумевается, что его распад идет без особых помех и с постоянной скоростью. Поэтому цель исследователя - зная условия образования помех, свести их влияние к минимуму. Когда же это осуществить невозможно, применение соответствующего радионуклида и сам метод приходится отвергать. Безусловно, желание исследователей располагать данными возрастной диагностики в необходимом для них объеме понятно. Однако подчеркнем еще раз: несмотря на то, что на сегодня радиометрические технологии в плане их применения для абсолютного датирования горных пород наиболее надежны, исследователи должны осознавать, что им и в этом случае нужно, прежде всего, вникнуть в суть соответствующей методики и строго придерживаться ее правил.

Наиболее известен из радиометрических методов, чаще применяем при изучении четвертичных образований и лучше отработан методически предложенный еще в 1946 г. Уиллардом Либби, радиоуглеродный анализ [Libby, 1955]. В нем в качестве радионуклида-таймера используется космогенный изотоп  $^{14}\text{C}$ , который накапливается в тканях растений и животных вместе с обычным углеродом  $^{12}\text{C}$ . В живых растениях и организмах соотношение внутри них изотопа  $^{14}\text{C}$  с обычным углеродом  $^{12}\text{C}$  обычно такое же, как в атмосфере. Однако после отмирания органики потребление углерода ее тканями прекращается, и внутри биологических остатков как в закрытой системе начинается распад изотопа  $^{14}\text{C}$ , итоговое соотношение которого с продуктами распада и обычным углеродом  $^{12}\text{C}$  позволяет достаточно точно определять возраст пород, в которых произошло захоронение этих остатков. На сегодня это один из наиболее надежных способов датирования образований квартера (правда, только позднеплейстоценовых). Хотя и по поводу его применения порой возникают споры, метод настолько отработан, что возникающие помехи в работе его таймера можно, по крайней мере - в значительной части случаев, учесть и внести необходимые поправки. Как избежать того, чтобы не использовались образцы, в которых могло произойти видоизменение накопленного в органике радионуклида-таймера или их заражение «чужим» углеродом, написано большое количество работ, и здесь на этом не будем останавливаться.

Отметим другое - наличие «чистых»  $^{14}\text{C}$ -датировок позволяет проводить калибровку и тестирование других, менее надежных методов абсолютного датирования четвертичных образований. Это сегодня крайне важно, поскольку поиск новых технологий возрастной диагностики горных пород происходит весьма активно, и они нуждаются в проверке хотя бы во временном интервале позднего плейстоцена, поскольку пределы датирования  $^{14}\text{C}$ -методом ограничены временными границами этой части квартера.

В принципе, предельно допустимое для учета уменьшение концентрации изотопа  $^{14}\text{C}$  в исследуемых образцах могло бы позволить, теоретически, датировать их во временном интервале примерно до 100 тыс. лет. Однако на практике из-за технических сложностей учета малых содержаний изотопов и продуктов их распада это пока нереально. На обычных радиоуглеродных установках лимитом надежных определений

является в среднем возраст лишь 40-50 тыс. лет. Существенно увеличить этот предел, причем - используя очень малые, в доли миллиграммов, навески, позволило внедрение упомянутой выше методики YMC-AMS. Однако приблизиться к теоретически возможному интервалу радиоуглеродного датирования все еще не удалось - выполненные и по технологии YMC-AMS  $^{14}\text{C}$ -датировки пока редко превышают величины в 70-75 тыс. лет.

Внедрение YMC-AMS-технологии позволило плодотворно использовать для определения возраста и другие космогенные изотопы. Хотя о результатах в большинстве случаев пока говорят осторожно, поскольку в природе редко соблюдаются главные условия радиометрического датирования - изначального отсутствия в образце дочерних продуктов распада, закрытости содержащих радионуклид-таймер систем (обеспечивающих невозможность процесса приноса-выноса как исходных, так и дочерних компонентов) и реальности учета возникающих помех. Тогда как недоучет и, тем более, игнорирование этих условий приводит к большому разбросу получаемых датировок, тем более что в данном случае приходится иметь дело с крайне малым содержанием изотопов, подсчет которых проводится, чуть ли не поштучно.

Тем не менее, на практике применение технологии YMC-AMS по результатам датирования по ряду содержащихся в горных породах изотопов уже характеризуется неплохими статистическими показателями. В первую очередь это относится к использованию космогенного изотопа  $^{10}\text{Be}$ , обычно анализируемого в паре с космогенным изотопом  $^{26}\text{Al}$ , накапливающихся в кварце в поверхностных слоях содержащих его пород.

Нужно сказать, что кварц в аспекте датирования применяется в разных геохронометрических технологиях. Это один из самых широко распространенных, химически чистых и стойких минералов, и в плане радиометрии по  $^{10}\text{Be}$  и  $^{26}\text{Al}$  он интересен тем, что эти, появляющиеся в кварце под воздействием космического облучения (в процессе расщепления ядер кислорода и кремния) изотопы оказываются в практически полностью закрытой системе. Первый из них распадается с образованием в итоге устойчивого элемента  $^{10}\text{B}$ , второй -  $^{26}\text{Mg}$ . Однако период полураспада у  $^{10}\text{Be}$  составляет более 1,5 млн. лет, а у  $^{26}\text{Al}$  - более 0,7 млн. лет, так что их нарастающее со временем содержание в приповерхностных слоях исследуемых пород может надежно служить временным критерием определенных событий в течение большей части плейстоцена.

Однако данный метод очень сложен, поскольку в  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$  технологии фиксируются весьма тонкие механизмы в процессе формирования горных пород, что требует соответствующего технического оснащения. Достаточно сказать, что в умеренных широтах в 1 г кварца в приповерхностных, экспонированных космическим лучам горных породах за год накапливается всего 3-5 атомов  $^{10}\text{Be}$ , и в России хоть и началось создание первых установок YMC-AMS, систем, способных работать с такими малыми содержаниями изотопов, к сожалению, пока еще нет. Тогда как анализ в зарубежных лабораториях на датирование по  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ , как и закупка за рубежом для этих целей готовых установок YMC-AMS, обходится очень дорого, что ограничивает применение метода. Сегодня он фактически используется только в работах, проводимых совместно российскими и зарубежными исследователями, когда сторона, представляющая зарубежных партнеров, берет аналитическую составляющую исследований на себя.

Тем не менее,  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ -метод весьма эффективен, и сегодня он широко используется. Главное, чтобы при его использовании соблюдалось условие переустановки начального состояния системы-таймера на нуль - тогда это позволяет достаточно уверенно, причем перекрывая практически весь плейстоцен, определять время экспонирования изучаемых пород космическому излучению.

Установка на нуль в данном случае означает выход на дневную поверхность еще не подвергавшихся космическому облучению слоев изучаемых горных пород. Поскольку космические лучи проникают в содержащую кварц породу неглубоко, и с глубиной содержание исследуемых изотопов быстро уменьшается, используется для пробоотбора на

данный вид анализа только кварц из приповерхностного слоя пород. Лучше всего, чтобы быть уверенным в валидности последующей датировки, использовать только примерно 5-см слой с поверхности переустановленных изначально на нуль обнаженных пород - скал или отдельных каменных глыб.

Хорошо подходят оказавшиеся на дневной поверхности содержащие кварц породы в обнажениях, возникших во время событий, вызвавших выход соответствующих слоев на дневную поверхность и правомочных быть тогда датируемыми. Например - в результате землетрясений, которые могут тогда быть фиксированы по времени изотопами  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ , накопившимися в стенках скальных блоков, расколотых в процессе соответствующих сейсмических событий. Пригодны также открытые невыветрелые поверхности обломков пород вытаявшей из-под льда основной морены и непосредственно стенки трогов, освободившихся ото льда после сокращения ледников. При этом допускается постулат, что перед экспонированием внешний слой на таких поверхностях был содран в процессе ледниковой эрозии, и в свежем слое, после его выхода на открытое пространство, под воздействием космического облучения начинается накапливание отмеченных изотопов, количество которых надежно покажет время экспонирования (рис. 2).



Рис. 2. Отбор проб на  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$  с поверхности обломков позднеплейстоценовой морены; Алтай – 2011 г.

При выборе исследуемых поверхностей нужно только учитывать, что открытость объектов могла в прошлом нарушаться появлением каких-либо природных экранов между космическими лучами и исследуемой поверхностью. Кроме того, даже крупные обломки пород могут (вследствие подмыва, например) переверачиваться, блокируя прежде открытую поверхность и подставляя облучению другую, прежде закрытую сторону. Поэтому лучше всего для датирования данным методом подходят объекты в областях с сухим и холодным климатом, где сток большую часть года законсервирован, а снега (который может экранировать космические лучи) немного, и он сдувается со скальных поверхностей, оставляя исследуемые слои открытыми (рис. 2).

Поскольку  $^{10}\text{Be}$  - радионуклид, осуществляются попытки использовать его свойства и в плане применения к нему стандартного подхода радиометрического

датирования, т.е. посредством поиска закрытых систем, в которых в результате какого-то события может оказаться минимально необходимое для последующих измерений количество этого изотопа. И тогда, в обычном порядке, сравнивая количество материнских и дочерних элементов, можно было бы зафиксировать возраст соответствующего события. Действительно,  $^{10}\text{Be}$  образуется и в атмосфере - за счет расщепления под воздействием космических лучей ядер азота и кислорода, и затем, выпав на землю с атмосферными осадками, может накапливаться в некоторых отложениях и почвах. Но все упирается в отмеченные выше требования последующего нахождения радионуклида в закрытой системе, или по крайней мере в системе, где внос/вынос изотопов можно было надежно учитывать каким-то способом.

Принимая во внимание полуторамиллионный период полураспада радионуклида  $^{10}\text{Be}$ , использовать его не только в скальных породах, но и в отложениях, конечно, заманчиво. Но нужно признать, что пока все известные попытки такого рода к появлению надежных возрастных определений не привело. Кроме того, в любом случае все эти подходы нуждаются в развитии сети установок YMC-AMS с разрешающей способностью, позволяющей учитывать малое количество элементов в изучаемых породах, а таких установок сегодня в России нет.

Среди радиометрических методик, использующих для датирования четвертичных образований другие радионуклиды, также есть работающие весьма неплохо. Однако их применение, как и в случае опосредованных методов, все-таки очень избирательно, поскольку трудно найти системы, в которых соблюдаются отмеченные выше условия. В частности, весьма продуктивно оказалось применение в качестве таймера радионуклидов по урановым сериям при датировании осадков Мертвого моря [Stein et al., 1997], где используется чередование слоев U-содержащего арагонита и блокирующих их слоев гипса. Неплохо работает методика по урановым сериям и при изучении сталактитов-сталагмитов, но, повторим, все это частные случаи - избирательного, а не широкого применения.

Так что, подводя итог в обзоре радиометрических методов датирования четвертичных образований, можно сказать, что в целом к технологиям широкого применения сегодня можно причислить пока только те, что используют изотоп  $^{14}\text{C}$  в захороненной органике и радионуклиды  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ , накапливаемые в поверхностных слоях содержащих кварц пород, обнажившихся во время соответствующего события. На сегодня этим технологиям нет альтернативы. Особенно в аспекте того, что при использовании в них «чистых образцов» благодаря большой степени независимости отражающего ход временной компоненты процесса, в котором она тогда выделяется, достигается высокая точность возрастных определений, в силу чего их можно использовать для калибрования опорных точек в целях отработки других методик датирования.

Кроме того, важным достоинством данных методик является простота пробоотбора. Так в случае  $^{14}\text{C}$ -датирования достаточно отобрать подходящую органику и высушить ее в тени. А при  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ -датировании - сделать небольшой скол с выделенной для возрастного определения, невыветрелой скальной поверхности (рис. 2), чтобы в обломке содержалось примерно около полкилограмма кварца - лучше, поэтому, сразу раздробить образец до мелкопесчаной фракции, а затем в полученной навеске провести сепарацию кварцевой составляющей. Остается упаковать, затем образцы практически в любую тару и отправить в лабораторию, но при этом учесть, что последующая обработка образцов требует в данном случае сложного технического оснащения, а эксплуатация подобной техники очень дорога и трудоемка. В силу чего стоимость одной  $^{14}\text{C}$ -датировки составляет сегодня как минимум \$150, а в случае датирования по  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$  она повышается в несколько раз, почти на порядок. И хотя ныне в России намечается существенное расширение сети установок радиоуглеродного датирования нового поколения, и в Новосибирском Академгородке практически создана для работы с изотопом  $^{14}\text{C}$  первая в России система YMC-AMS, этого явно недостаточно. Поэтому

параллельно развитию технологий радиометрического датирования идет поиск альтернатив.

В настоящее время предложить альтернативы могут методы, использующие технологии дозиметрического датирования. Рассмотрим их (рис. 1), сделав акцент на тех, что на наш взгляд наиболее перспективны и приемлемы для применения, в том числе в условиях Сибири. Отметим только еще раз, что, несмотря на использование свойств радиоактивности, дозиметрические технологии - иной тип датирования, кардинально отличающийся от радиометрического и по принципу датирования, и по технике его исполнения, и по правилам пробоотбора.

### *Технологии дозиметрического датирования*

#### *Общая характеристика и основные методические приемы*

Острая необходимость в результатах возрастной диагностики четвертичных отложений, ограниченность потенциала технологий радиометрического датирования и высокая стоимость получаемых с их помощью датировок потребовали разработки таких методов, которые оперировали бы широко распространенными среди горных пород таймерами, охватывали большой временной диапазон и при этом оставались надежными. Достижения в области приборостроения позволили в середине прошлого века учитывать очень тонкие изменения в минералах, и в итоге и были разработаны методы, также использующие явление радиоактивности, но, как было отмечено выше - наоборот. Иными словами, приходится опираться на учет не распада радионуклидов, а приобретение определенными минералами новых свойств в результате поглощения ими некоторой дозы излучения различных радионуклидов, которые в той или иной мере практически всегда присутствуют в горных породах.

Как и в случае радиометрических методов, среди используемых дозиметрических технологий также выделяются те, что работают избирательно, по отдельным типам горных пород и сложенных ими образований, и те, что оперируют минералами-таймерами, которые могут работать по широкому спектру объектов исследования. К числу первых принадлежит метод электронно-парамагнитного или - другое его название - электронно-спинового резонанса (ЭПР-ЭСР), неплохо работающий по карбонатным (особенно содержащим известковые органические реликты) и некоторым другим породам. К числу вторых относятся методы стимулированной люминесценции, преимущественно работающие по мелкозему пород, содержащих силикаты. Хотя пользователи результатами датирования не очень любят вникать в суть его технологий, в данном случае остановиться на этой сути подробно просто необходимо, поскольку дозиметрические технологии оперируют очень тонкими механизмами в развитии минералов, и должно быть понятно, насколько важно учитывать их и соблюдать методические требования.

Достоинство дозиметрических методов в их значительном диапазоне датирования, существенно превышающем интервал временного охвата радиоуглеродным методом (обычно это сотни тысяч лет, у некоторых дозиметрических технологий - до миллиона лет и больше) и использовании в качестве таймеров минералов, широко распространенных в четвертичных образованиях. Недостаток - высокая чувствительность дозиметрических свойств минералов-таймеров к изменениям внешней для них среды и возможность ощутимой трансформации этих свойств под воздействием подобных изменений. Это крайне важно осознать исследователям.

Подчеркнем: не всякий минерал, способный абсорбировать радиацию и приобретающий новые свойства при поглощении продуктов радиоактивного излучения, может быть надежным дозиметром - носителем информации о величине полученной им дозы облучения, и не каждый минерал-дозиметр может служить хорошим таймером. Из чего следует - необходимы тщательный учет внешних, для исследуемых образований, воздействий на минерал-таймер и принятие во внимание степени их влияния на конечный

результат датирования. В противном случае будет иметь место неопределенность возрастных определений и большой разброс датировок.

В этом плане нужно отметить, что острые дискуссии, связанные с применением дозиметрических методов, большей частью как раз и происходят из-за желания исследователей упростить, или даже игнорировать учет помех, влияющих на дозиметрический процесс. Нередко происходит так, что, результаты дозиметрического датирования критикуются из-за большого разброса получаемых с его помощью возрастных определений, а когда впоследствии проводится детальный анализ этих данных, оказывается, что чаще всего они являются итогом элементарного нарушения правил пробоотбора. С разбором подобных ситуаций автору приходилось выступать не раз [*Шейнкман, 2008; Шейнкман и др., 2009; Шейнкман, Мельников, 2011; Sheinkman et al., 2011*], тем не менее, в ходе дебатов порой продолжают озвучиваться не только сетования на отмеченную выше «заумь» методик, но, порой, и призывы прекратить пользование некоторыми из них.

Поэтому поставим акцент еще раз на том, что если исследователи хотят оперировать валидными возрастными определениями, то нет иного способа получить их, как посредством вникания в упомянутую «заумь» методик, налаживания тесного контакта между пользователями результатами датирования и его разработчиками, и тщательного соблюдения соответствующих методических правил. В первую очередь - правил пробоотбора и хранения образцов. Ибо эти правила в случае дозиметрического датирования особенно строги, и в изрядной степени именно их нарушение вызывает разброс датировок.

Излучение, которое поглощают минералы-дозиметры, характеризует слабый радиационный фон, формируемый радиоактивными элементами, в той или иной мере всегда содержащимися в любых четвертичных породах. Причем подавляюще большую долю этого фона из всего перечня известных природных радионуклидов определяет лишь ограниченное их число - изотопы, входящие в радиоактивные семейства U и Th, а также практически постоянно присутствующий в породах изотоп  $^{40}\text{K}$ . Что касается космического облучения, которое также создает свой фон, то его можно игнорировать, потому что оно воздействует только на приповерхностные слои горных пород, которые в данном случае удаляются перед проведением пробоотбора.

Учитывая, что перераспределение основных радионуклидов в уже отложенных породах происходит редко, а влияние кратко живущих изотопов относительно невелико (в любом случае всегда можно выбрать блоки пород, где оно минимально), радиационный фон в исследуемых отложениях для основного, по крайней мере, отрезка квартала с определенной долей допустимости можно считать постоянным. Ибо период полураспада преобладающих радионуклидов заведомо больше этого отрезка: у  $^{235}\text{U}$  он составляет - 0,7 млрд. лет, у  $^{40}\text{K}$  - 1,3 млрд. лет, у  $^{238}\text{U}$  - 4,46 млрд. лет и у  $^{232}\text{Th}$  - 14 млрд. лет.

Нужно только принимать во внимание, что внутри пород радионуклиды распределены беспорядочно и величина активности радиационного поля будет меняться от места к месту, характеризуя только конкретную точку в толще изучаемых пород. Знать эту величину при расчетах возрастных определений необходимо, поэтому сразу отметим **первое правило** дозиметрического датирования: *для каждого образца в точке его отбора нужен свой, тщательно проведенный инструментальный замер активности радиационного поля.*

Причем нужно учитывать, что все приборы-радиометры имеют отличия. Поэтому используемый исследователями инструмент должны проходить сверку с тем инструментом, которым пользуются исполнители датирования.

Никакие усредненные обобщения при замере величины радиационного фона неуместны - они приводят к неопределенности и разбросу датировок. В частности, это касается процедуры усредненного вычисления интенсивности облучения минерала-дозиметра в отбираемом образце по содержанию радионуклидов. Как отмечалось, важно иметь в виду, что уже в соседних точках изучаемого образования, буквально в нескольких

сантиметрах от точки пробоотбора, интенсивность облучения может быть совершенно иной, хотя отбираемый образец получает интегрированную дозу облучения от блока пород диаметром около 1,5 м (см. ниже).

Все эти процедуры, конечно, осложняют и сам пробоотбор, и технологию датирования в целом. Но, повторим, усредненные показатели неуместны - они приводят к неопределенности датировок. Тем более что отечественной промышленностью в настоящее время освоен выпуск высокоточных полевых радиометров, которые несложно приобрести, таких, как, например, используемый автором настоящей статьи радиометр ДКС-96. Эти радиометры вполне пригодны для данных целей и, по опыту автора, ничуть не уступают аналогичным популярным американским моделям типа RAM DA-2000 и др., которые стремятся приобрести исследователи.

Изменения в минералах-дозиметрах, используемые в дозиметрических технологиях датирования, обусловлены появлением блуждающих по кристаллической решетке этих минералов электронов, получивших под воздействием фоновой радиации добавочную энергию. Дальнейшая жизнь таких электронов порождает в минералах явления и процессы, параметры которых могут быть измерены специальной аппаратурой и интерпретированы как отражение временной компоненты, поскольку количество таких электронов зависит от сроков облучения минерала.

Поскольку используемые в данном случае минералы являются диэлектриками, в обычном состоянии электроны в них прочно привязаны к валентным оболочкам. Но в радиационном поле, под воздействием бомбардировки минерала-дозиметра продуктами радиации, ситуация меняется. Те электроны, на которые натолкнулись излученные радионуклидами частицы и кванты, становятся (получив от них, таким образом, добавочную энергию) возбужденными и порой могут срываться со своих мест, где образуются дырочные положительные электрические заряды. Некоторое время (оно характеризует метастабильное состояние электронного ансамбля) электроны будут блуждать по кристаллу минерала-дозиметра, однако атрибутом используемых минералов является наличие в структуре их кристаллической решетки иных (кроме дырочных) точечных областей с положительным электрическим зарядом - центров захвата электронов. Их называют ловушками электронов (о природе ловушек подробнее будет отмечено в разделе о люминесцентных методах). Есть среди них ловушки со слабым захватом - их называют мелкими, и есть с достаточно большой удерживающей силой - их называют глубокими.

Отражая тенденцию электронного ансамбля вернуться в стабильное состояние, свободные электроны стремятся к рекомбинации - встречая дырки, часть из них удерживается ими, т.е. возвращается в валентную зону. Но другая часть электронов надолго попадает в глубокие ловушки. Иными словами, последние будут служить основой дозиметрического часового механизма, поскольку возбужденные электроны по мере их появления попадают в эти ловушки, постепенно заполняют их и могут удерживаться ими весь датированный период. Но в отличие от обычных, постоянно заводящихся, часов дозиметрический механизм может работать только до тех пор, пока ловушки не будут заполнены.

Количество отмеченных ловушек определяется структурой минерала-дозиметра. Если они были каким-то образом опустошены, и затем в новообразованных породах началось их заполнение, этот процесс, собственно, и может быть используемым как дозиметрический часовой механизм, работающий до тех пор, пока ловушки не заполнятся. Отсюда пределы датирования соответствующим минералом-дозиметром. У силикатов время максимального заполнения ловушек исчисляются первыми сотнями тысяч лет, у карбонатов - уже миллионами (по крайней мере - первыми миллионами) лет.

Поскольку любой часовой механизм должен иметь точку отсчета, из обозначенного выше вытекает **второе правило** дозиметрического датирования - *минерал-дозиметр исходно должен быть выведен на нуль, и только затем может быть пригоден в роли таймера*. Таким образом, выполняющий роль таймера минерал-дозиметр исходно должен

быть отбелен: приведен в состояние, когда все его ловушки максимально опустошены. Важно подчеркнуть, что использование в качестве часового механизма накопление электронов в ловушках должно исходно начинаться именно с этого состояния.

Следовательно, в качестве таймеров могут быть, прежде всего, использованы новообразованные минералы-дозиметры, например - те, что содержатся в органо-карбонатных, пещерных известково-натечных (сталактиты-сталагмиты), вулканических и некоторых других породах. А также те минералы-дозиметры, которые могли быть переустановлены в ходе своего развития на нуль, подвергшись воздействию, которое принуждает электроны в ловушках покинуть их и отдать при этом энергию, полученную ими при облучении. В этом случае в песчинках минерала-дозиметра стирается временная информация, содержащаяся в нем прежде в виде накопленной за определенный период дозы облучения, а также доза облучения, полученная минералом когда-то любым иным путем - они характеризуют прогенетическую память минерала-таймера (рис. 3).



Рис. 3. Принцип дозиметрического датирования в случае переустанавливаемых на нуль (отбеливаемых) образцов

Известно два, надежно обнуляющие минералы-таймеры, воздействия. Первое - обжиг горных пород при высокой температуре: в процессе изготовления керамики, воздействия на отложения лесных пожаров, раскаленной лавы и т.п. Второе воздействие - активное пронизывание минералов ультрафиолетовыми лучами, которое наиболее эффективно происходит в результате переноса эолового материала до его отложения или переивании мелкозема ветром. Поэтому лучше всего в качестве переустановленных таким способом на нуль пород подходят для дозиметрического датирования лессы. Неплохо отбеливается также мелкозем косового и дельтового аллювия, но только в определенной ситуации: когда отдельные небольшие струи переивают песчинки, поворачивая их и, тем самым, подставляя солнцу с разных сторон, а затем оставляя на осушенной поверхности, т.е. без экранирования песчинок водной пленкой. В течение нескольких дней такая процедура стирает в песчинках минерала-дозиметра всю содержащуюся в нем прежде прогенетическую память. Нужно только, чтобы фракция мелкозема была не крупнее 0,25 мм, иначе пронизывание песчинок ультрафиолетовыми лучами не будет эффективным.

Что касается быстро погребаемых отложений - склоновых, ряда ледниковых и др., а также постоянно экранированных от солнца осадков - подповерхностных, субаквальных, пещерных и т.д., пусть и содержащих необходимую фракцию мелкозема, песчинки в нем не проходят должную обработку ультрафиолетовым светом. Величина содержащейся в

минералах-дозиметрах прогенетической памяти в этом случае всегда остается неопределенной, и, соответственно, тогда не может быть вычислена поглощенная ими последующая доза радиации (рис. 4).



Рис. 4. Пример предварительного обследования объектов на пригодность для дозиметрического датирования; Израиль, 2007 г.

Подчеркнем: все подобные отложения отбраковываются сразу, и никакие упрощения здесь неуместны - они ведут к искажению и неопределенности датировок. Например, исполнители датировок [Власов, Куликов, 1977,1987] при датировании плейстоценовых ледниковых отложений на Алтае (затем эти датировки были включены в схему [Разрез..., 1978]) за условный нуль древних основных морен брали величину остаточной прогенетической памяти в моренах современных ледников. Хотя последние находились порой в десятках километров от места расположения древних морен. Такой подход некорректен уже в своей основе, поскольку заметно меняет интенсивность облучения минерала-таймера разброс радионуклидов даже в соседних, в нескольких сантиметрах друг от друга, точках одного разреза, не говоря о разных толщах. Естественно все подобные датировки были впоследствии обозначены как невалидные, а повторное, проведенное автором по более совершенной методике датирование выявило, что исследованные отложения в несколько раз моложе [Шейнкман, 2002].

Отмеченное не означает, что ледниковые отложения нельзя датировать подобным способом вовсе. Если имеют дело с бывшей поверхностной мореной, например, то вполне пригодны для датирования песчаные линзы, формируемые «в тени» потока талой воды за крупными валунами. В этом случае песчинки из морены, перемываемой мелкими струйками на солнце, успевают исходно пройти достаточное для отбеливания экспонирование под ультрафиолетовым облучением. Подходит и ряд собственно водно-ледниковых отложений - тех, в которых также имеет место процесс исходного отбеливания.

Нужно отметить, что порой в литературе встречаются упоминания о том, что вывод на нуль - стирание в минерале-дозиметре прежней временной информации - происходит также при механическом дроблении обломков горных пород и выплеске энергии во время резких тектонических движений. Для проверки автором был проведен эксперимент, в процессе которого отобранные образцы специально подвергались механическому дроблению вплоть до пылеватой фракции. Он показал, что содержащаяся в них временная информация после такого воздействия не меняется.

Аналогичный эксперимент был проведен для оценки появления возможного отбеливающего воздействия в процессе тектонических движений. Использовалось датирование классических сейсмиков (слоев осадочных пород, смятых во время землетрясений) в районах постоянного проявления активных сейсмических процессов - в Горном Алтае и в котловине Мертвого моря (рис. 5).

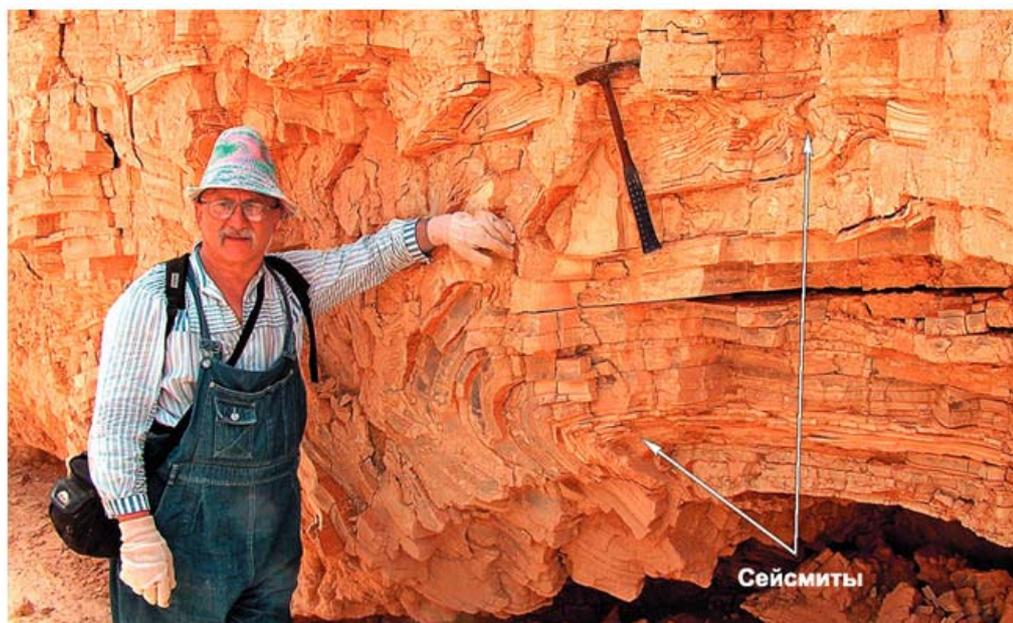


Рис. 5. Сейсмикты (смятые и дислоцированные в результате землетрясений осадки) в разрезах датированных отложений в котловине Мертвого моря; Израиль, Июль, 2008 г.

Результат был однозначен: возрастные определения одних и тех же слоев внутри сейсмиков и вне их различались лишь в пределах обычной для датирования погрешности.

Регулятором дозиметрического часового механизма является активность радиационного поля, в котором находится минерал-дозиметр. Однако точно измерить этот параметр инструментально можно только сегодня. Встает вопрос: чтобы быть правильно показывающим время, рассмотренный часовой механизм должен быть отлаженным, и насколько исследователи могут быть уверены, что у соответствующих пород величина активности радиационного поля, в котором находится минерал-дозиметр, будучи измеренной как параметр сегодня, в качестве устойчивой характеристики изучаемых отложений может быть распространена на весь датированный период?

Иными словами, после запуска дозиметрический часовой механизм должен находиться в радиационном поле, обеспечивающем постоянную скорость появления возбужденных электронов и заполнения ими ловушек и каким-то образом должны соблюдаться определенные нормативы, гарантирующие это обеспечение. Им отвечает **третье правило** дозиметрического датирования. Оно заключается в *проведении тщательного предварительного обследования изучаемых объектов с целью выявления и последующего отбора для датирования лишь тех из них, которые содержат минерал-таймер не только исходно отбеленный, но и облученный затем в радиационном поле с не менявшейся активностью на протяжении, по крайней мере, большей части датированного периода.*

Прежде всего, блок изучаемых пород должен быть монолитным, поскольку по трещинам могут мигрировать подвижные радионуклиды, например - газ радон. Кроме того, нужно вообще избегать пород, в которые потенциально могли проникать кратко живущие радионуклиды. Тот же радон имеет период полураспада всего 3,8 суток, но обладает высокой радиоактивностью - зафиксировать его появление в соответствующее

время практически невозможно, но, периодически появляясь и быстро распадаясь, он может изрядно изменить общую дозу поглощенной минералом-дозиметром радиации.

Кроме того, необходимо иметь в виду, что даже в случае установления стабильности источника излучения оно еще не обозначает стабильность собственно облучения минерала-дозиметра, выбранного в качестве минерала-таймера, поскольку между ним и излучателем могут возникать различные фильтры. В первую очередь нужно обратить внимание на увлажненность пород, так как даже связанная вода, обволакивая частицы минерала-дозиметра, принимает на себя существенную долю направляемого к нему потока радиации. Появляясь и исчезая, фильтр такого рода изрядно меняет степень облучения песчинок минерала-таймера, из чего следует, что могут быть датированы лишь те породы, что не претерпели больших колебаний влажности/льдистости. В этом плане очень удобны для датирования многолетнемерзлые толщи (вне сезонно-талого слоя), поскольку без оттаивания нарушить их монолитность или изменить величину льдистости/влажности непросто. Если же обследование изучаемых образований покажет, что в датируемый период их увлажненность могла существенно меняться (например - в обстановке прибрежных комплексов), такие объекты должны отбраковываться. Особенно, если есть подозрение, что исследуемые породы находились под периодическим воздействием подземных вод, которые нередко содержат растворенные радионуклиды.

Встает другой вопрос: что же делать, когда значительная часть отложений не является мерзлыми и формируется в режиме обводнения? Выход один - из исследуемых отложений выбираются тогда только те, что после осушения находились в состоянии с постоянной влажностью в течение большей части датируемого периода. В крайнем случае, если эта их характеристика остается невыясненной, в результаты датирования должны будут внесены поправки на большую погрешность. Приведем два примера из опыта автора.

В котловине Мертвого моря им изучались аллювиальные толщи, исходно обводненные, но затем перешедшие в состояние с малой влажностью [Sheinkman, 2002; Sheinkman, Shlukov, 2001]. Поскольку этот район находился на всем протяжении квартера в сухих субтропиках, в итоге исходное состояние пород практически не повлияло на результат их датирования. Второй пример - когда изучались образования ледникового комплекса на Алтае [Шейнкман, 2002]. Тогда датировались изначально обводненные осадки, но только те из них, что вскоре после своего исходного отложения были, благодаря активной тектонике, значительно подняты над днищем долин и затем, находясь в условиях сухих степей и полупустыни, не испытали больших колебаний увлажненности. В итоге их первичная увлажненность практически не повлияла на результаты датирования.

Подчеркнем, учесть все помехи в работе дозиметрического часового механизма невозможно. Нивелировать их влияние, чтобы не вносить в датирование существенный элемент неопределенности, реально только посредством статистического контроля датировок, по крайней мере - применяя методику статистики малых величин. В этом случае датировки-выбросы надежно фиксируются, и снимается вопрос о случайности получаемых возрастных определений. Отсюда вытекает **четвертое правило** дозиметрического датирования: *на изучаемом объекте должен проводиться не единичный, а серийный отбор образцов - желательно вдоль и поперек исследуемого слоя, позволяющий проводить статистический контроль получаемых возрастных определений хотя бы на уровне статистики малых величин* [Шейнкман, 2002; Шейнкман и др., 2009, 2011; Sheinkman et al., 2011].

Можно отметить и другие правила дозиметрического датирования, но они касаются уже собственно технологий определения возраста горных пород и сложных ими образований. Поэтому речь об этих правилах пойдет при освещении соответствующих методик. Но прежде чем перейти к сути этих методик, напомним, что она у всех дозиметрических методов одна - это анализ заполнения ловушек в минерале-дозиметре, выбранного в качестве таймера, электронами, появляющимися в минерале под

воздействием радиации, и только способ подсчета заполненных ловушек характеризует отличия подходов.

Причем нужно понимать, что заполнение ловушек это процесс динамического равновесия. Ведь бомбардировка атомов частицами радиоактивного распада не идет избирательно - эти частицы соударяются не только с электронами на валентных оболочках. Могут попасть они и в те электроны, что захвачены ловушками, обуславливая частичную их утечку на этих ловушках - это явление названо радиационным федингом (от английского слова «fading», означающего постепенное исчезновение). Если бы не было этого явления, пределы дозиметрического датирования были бы намного больше.

### *ЭПР-ЭСР метод*

Упомянутый выше ЭПР-ЭСР метод использует для датирования процесс накапливания в минерале, под воздействием поглощенной им радиации, электронов с изменившимся спином. Название и понятие «спин» появилось на основе английского слова «spin», означающего «вращение, кружение» - из-за того, что ранее предполагалось, что электрон подобен вращающемуся волчку, и данная величина будет характеристикой такого вращения. Затем с позиций квантовой механики электрону стали приписывать собственный момент количества движения, и именно с ним ныне отождествляют понятие «спин». Но в нашем случае важна не суть устоявшегося названия, а то, что электрон является заряженной частицей, и при вращении вокруг своей оси - спиновом движении - у него возникает магнитное поле, т.е. он остановится элементарным магнитом, свойства которого позволяют учитывать электроны, попавшие в ловушки. Отсюда корень «спин» в термине и аббревиатуре ЭСР, которые превалируют в зарубежной литературе.

Второе название метода связано с парамагнитными свойствами используемых минералов-таймеров. Напомним, что парамагнетизм, как свойство вещества намагничиваться во внешнем магнитном поле, обусловлено наличием у вещества парамагнетика магнитных моментов - физического параметра, характеризующего магнитные свойства вещества. Карбонаты и силикаты, обычно используемые в ЭПР-ЭСР датировании, не являются магнитами, но под воздействием радиации они могут накапливать некоторый потенциал магнитных свойств за счет появления в кристаллах возбужденных электронов. Так в кристаллической решетке карбонатов электроны, как правило, образуют пары, и тогда их магнитные моменты компенсируют друг друга. Но когда в минералах, при поглощении ими части энергии фонового радиационного поля, появляются возбужденные электроны, эти частицы, став свободными, не спаренными, после блуждания по кристаллической решетке захватываются ловушками, в которых образуются парамагнитные центры. Ибо каждая из ловушек захватывает только по одному электрону, и, будучи не спаренным, такой электрон создает свой магнитный момент. В силикатах поддающиеся подсчету парамагнитные центры также формируются при захвате ловушками свободных электронов.

Так или иначе, число парамагнитных центров в кристалле отмеченных минералов будет являться в данном случае функцией времени их облучения, и вопрос использования этого фактора может быть решен посредством нахождения способа подсчета таких центров. Нужно сказать, что появилась технология подсчета парамагнитных центров задолго до применения свойств ЭПР-ЭСР в датировании. Она была создана еще в 1944 г., когда известным российским физиком Е.Г. Завойским было открыто явление электронно-парамагнитного резонанса (отсюда другое название данной технологии датирования). Суть этого явления в том, что парамагнитный образец, помещенный в постоянное магнитное поле, может поглощать энергию подаваемого на него переменного электромагнитного поля. Этот процесс имеет избирательный - резонансный - характер и может наблюдаться лишь при определенном, достаточно надежно фиксируемом соотношении между напряженностью постоянного магнитного поля и частотой переменного электромагнитного поля [*Завойский, 1990*].

Хотя разработка Е.Г. Завойского была оценена как переворот во многих областях физики, и ныне учреждена международная премия имени этого выдающегося исследователя, для возрастной диагностики горных пород ЭПР-ЭСР метод был предложен, лишь, спустя четверть века после открытия собственно явления ЭПР-ЭСР. Точкой отсчета считаются публикации известного исследователя в области дозиметрии и абсолютного датирования Э. Целлера, который сначала в статье с коллегами [*Zeller et al., 1967*], а затем в персональной статье [*Zeller, 1968*] представил методику подсчета образующихся в минерале-дозиметре парамагнитных центров в целях использования его как таймера. В течение двух десятилетий после этого было некоторое затишье в применении ЭПР-ЭСР технологии датирования, но затем началось, к сожалению - преимущественно за рубежом, активное внедрение этой технологии в практику четвертичных исследований [*Grun, 1989; Ikeya, 1993, 1994; Rink, 1997; Molodkov, 1996, 2001*].

Применение данной технологии спектроскопии минералов, как метода датирования, показало, что лучше всего она работает по карбонатам. В случае новообразованных органогенных пород это будет, например, карбонат в зарождающихся раковинах моллюсков, зубной эмали и костях живых существ и т.п. В случае новообразованных неорганических образований пригодны вновь возникшие пещерные формы, например - известковые сталактиты и сталагмиты. А в случае переустановленных на нуль пород - карбонат в артефактах из прошедшей обжиг керамики или в измельченных отложениях, исходно переветренных или пережженных на солнце, например - в песке из ракушечника.

Некоторый позитивный опыт накопился уже и при ЭПР-ЭСР датировании по кварцу содержащих его новообразованных вулканических пород - их использование в последние годы осуществляется, в частности, и в России [*Богатилов, 2002; Шабалин, 2002; Вяткин, 2007*]. Однако в целом набор пород, которые можно таким образом датировать, все-таки, очень ограничен. Делаются попытки распространить ЭПР-ЭСР метод и на более широкий круг минералов-дозиметров, включив в их число различные типы карбонатов и силикатов, однако их использование пока сопровождается значительным числом невалидных датировок, и возрастные определения такого рода еще не получили широкого распространения. Тем более что, как и в случае радиометрических методов, технология ЭПР-ЭСР очень трудоемка и дорога, и эксперименты с различными минералами-дозиметрами требуют значительных средств, которые далеко не всегда есть в распоряжении исследователей.

В принципе, когда имеют дело с новообразованными минералами или дозиметрами, надежно переустановленными на нуль, метод ЭПР-ЭСР, обладает достаточно высокой точностью. При датировании по карбонатам во временном диапазоне он перекрывает практически весь плейстоцен, и, что крайне важно, в этом случае ЭПР-ЭСР технология датирования может использоваться при работе по значительному спектру морских отложений, что имеет большое значение при изучении четвертичных образований в Сибирском секторе Арктики. Намного перекрывая временной рабочий диапазон радиоуглеродного метода, наиболее часто применяемого для диагностики событий квартала, пусть и с помощью отдельных возрастных определений, технология ЭПР-ЭСР датирования позволяет надежно датировать достаточно древние четвертичные толщи. В том числе в целях тестирования возрастных определений, получаемых иными, прежде всего, экспериментальными дозиметрическими методами, что крайне важно для развития базы датирования четвертичных отложений.

Длительное время в бывшем СССР направление ЭПР-ЭСР датирования наиболее активно разрабатывалось в Эстонии. Тем не менее, в России сегодня действует несколько ЭПР-ЭСР установок, и хотя они большей частью загружены в плане спектрометрии, направленной на исследования иных свойств горных пород, в отечественной литературе, как уже было упомянуто, тоже стали появляться материалы о свежих разработках в

области ЭПР-ЭСР датирования. В частности - при датировании по кварцу вулканических пород Эльбруса [Богатиков, 2002; Шабалин, 2002; Вяткин, 2007].

Вместе с тем, стоимость проведения подобных работ очень высока. Она примерно того же порядка, что и стоимость радиометрического датирования по  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ , в силу чего в отечественной литературе данные ЭПР-ЭСР датирования приводятся не часто. Поэтому усилия исследователей продолжают быть направленными на поиск новых технологий возрастной диагностики четвертичных отложений, опирающихся на изучение дозиметрических свойств. На наш взгляд, сегодня в этом плане наиболее перспективны методы стимулированной люминесценции. Хотя они и носят пока еще экспериментальный характер, но именно в них заложена основа на переход к доступным и недорогим по стоимости определениям абсолютного возраста изучаемых объектов при сохранении надежности этих определений. Перейдем к рассмотрению таких технологий.

### *Технологии стимулированной люминесценции*

#### *Общая характеристика и имеющиеся подходы*

В первую очередь следует отметить, что все технологии стимулированной люминесценции требуют учета еще более тонких механизмов в процессе развития минералов-дозиметров, чем в вышеописанных случаях. Изучение таких механизмов сегодня нередко осуществляется с помощью подходов на основе использования и экспериментальной аппаратуры, и экспериментальных методов дозиметрической диагностики, что, естественно, не уменьшает дискуссионность проблемы датирования данным способом.

Однако поиск альтернатив сложным и дорогим методам, не позволяющим работать по широкому спектру четвертичных отложений и не дающим возможность проводить серийный отбор образцов из-за высокой стоимости возрастных определений, сегодня крайне необходим. Поэтому, прежде всего, постараемся разобраться в причине ведущихся в отношении люминесцентных технологий дискуссий об их надежности и снять их основные болевые моменты.

Если в ЭПР-ЭСР технологии в основном используются карбонаты, то в технологиях стимулированной люминесценции наиболее пригодными оказались силикаты: кварц и полевые шпаты. По своей природе данные минералы являются не только дозиметрами, но и люминофорами: при определенном воздействии захваченные в их ловушках электроны покидают их, и при этом испускаются кванты света - фотоны. Возникает свечение - люминесценция, отсюда и название технологий - стимулированной люминесценции. Хотя сила этого свечения крайне невелика, сегодня с помощью специальной аппаратуры его можно фиксировать и с высокой точностью измерить. Оценивая, как и в случае ЭПР-ЭСР технологии, количество возбужденных электронов, захваченных в ловушках кристаллов используемых минералов-таймеров, и переходя, таким образом, к оценке временного критерия, отражаемого данным процессом.

Воздействием-стимулятором, вызывающим свечение рассматриваемых люминофоров, может быть принудительный подвод к ним тепла при определенной температуре или направленный, с определенной длиной волны, световой луч - способ стимулирования отражается в названии соответствующей методики. При использовании теплового воздействия это будет технология термической люминесценции (ТЛ). При воздействии светового луча с определенной длиной волны - оптико-стимулированной люминесценции (ОСЛ), в разных, в зависимости от спектра облучения, вариантах: инфракрасной, зеленого света и др. - тогда к аббревиатуре ОСЛ добавляются соответствующие буквы - ИК, З и т.д.

Все технологии стимулированной люминесценции используют диспергированные силикаты песчано-супесчаной (реже - более мелкой, алеврито-пелитовой) фракции, которые широко распространены среди четвертичных отложений и теоретически

позволяют датировать практически любые из слагаемых ими пород. Но, как и в остальных технологиях датирования, здесь тоже нужно принимать во внимание реальность помех в системе учета временной компоненты, из-за чего у данных методов есть свои, причем очень жесткие ограничения. Тем не менее, в случае решения этой проблемы, т.е. нахождении способа учета отмеченных помех, становится возможным датировать четвертичные отложения с достаточно высокой точностью и по широкому их спектру. Обычно - в пределах первых сотен тысяч, но в отдельных случаях до миллиона лет, а иногда и больше - когда радиационное поле в толще исследуемых пород имеет очень малую интенсивность, и, соответственно, будет мала скорость заполнения ловушек минерала-дозиметра. Причем приемлемы для люминесцентного датирования те из отложений, которые недоступны для возрастной оценки другими способами временной привязки изучаемых комплексов.

Наибольшее распространение получила технология термического стимулирования люминесценции, которая была применена в датировании намного раньше других. Она используется уже более полувека в археологии, а с конца 1960-х гг. и в геологии. Пальма первенства в первом случае принадлежит американским, а во втором - украинским и российским исследователям. И хотя вокруг ТЛ метода идет много дебатов, ему нет альтернативы. Вопрос заключается не в обсуждении целесообразности его внедрения и использования, а в осознании исследователями необходимости вникания в суть метода, чтобы избежать негатива заложенных в нем, как и в любом ином методе, недостатков. Так или иначе, ТЛ метод отработан лучше других, и на наш взгляд имеет при проведении датирования четвертичных отложений наибольшую перспективу.

Явление термически стимулированной люминесценции минералов было открыто Робертом Бойлем еще в 1663 г., но в датировании оно начало применяться лишь в середине прошлого века. Только тогда благодаря развитию прецизионной техники стало возможным фиксировать стимулированную люминесценцию на уровне малых энергий и интерпретировать ее вылеск как адекватный дозе радиации, поглощенной минералами-дозиметрами ТЛ сигнал. Впервые ТЛ метод в целях датирования использовался для археологических объектов, и сделано это было в середине прошлого века исследователями в США [*Daniels et al., 1953*]. В данной области метод стал активно использоваться за рубежом [*Kennedy, Knoph, 1960; Aitken et al., 1964*], поскольку археологи часто имели дело с артефактами из керамики, в которой частицы минерала-дозиметра исходно были надежно переустановлены на нуль после обжига. Ибо в начале использования технологии именно поиск надежно отбеленных, исходно, материалов считался главной проблемой.

Для того чтобы использовать метод в геологии потребовалась разработка специальных приемов, нацеленных на использование минералов-дозиметров, исходно отбеленных иным способом. Впервые для изучения геологических объектов применение ТЛ метода было начато в СССР. Оно было обосновано Г.В. Морозовым, и в конце 1960-х гг. им в Киеве, и параллельно А.И. Шлюковым в Москве, были созданы первые лаборатории ТЛ датирования четвертичных отложений. Однако Г.В. Морозова, к сожалению, вскоре не стало, некоторое время его дело продолжал В.Н. Шелкопляс, но затем ТЛ лаборатория на Украине была закрыта, и больше не восстанавливалась [*Морозов, 1968; Шелкопляс, 1974; Шлюков и др., 1990; Morosov, 1968*]. Что касается России, ТЛ датирование активно развивалось здесь до середины 1990-х гг.: тогда было организовано несколько лабораторий, в том числе в Сибири, где первая из них в 1985 г. была создана автором настоящей статьи. Но потом и здесь большинство лабораторий было закрыто. Иными словами, СССР поначалу занимал лидирующие позиции в данной области науки, но потом, к сожалению, многие из них были утрачены.

Следует отметить, что с началом активного использования ТЛ метода наряду с валидными датировками пошел вал явно неправдоподобных результатов, поскольку ряд тонкостей и влияющих на ТЛ процесс помех тогда еще не был понятен. В поисках выхода исследователи пошли разными путями. За рубежом, где метод был рожден, если брать

отсчет от начала его применения в археологии, решили, опираясь на успехи в приборостроении, не менять доставшуюся от использования в археологии изначальную физическую сущность подхода (о ней - чуть позже). Законсервировав ее, там пошли по пути инженерного решения проблемы - насыщения лабораторий все более усложняющейся дорогой аппаратурой и внесением, с ее помощью, корректив в возрастную составляющую.

В нашем случае, когда автор со своими коллегами стал восстанавливать позиции ТЛ датирования в России, подобных возможностей не было, и, как часто бывает, именно это дало положительный эффект [*Шейнкман, 1995, 2002; Шейнкман и др., 2009, 2011; Sheinkman, 2002, 2011*]. Было решено вникнуть глубже в суть прежней методики и, разобравшись в ней более детально, понять: возможно, в ней самой изначально были заложены просчеты. Кроме того - постараться избавиться от сложных дорогостоящих процедур и сделать технологию люминесцентного датирования надежной, доступной по стоимости возрастных определений и позволяющей вести серийный отбор образцов. Это потребовало значительных усилий, средств и времени, но в итоге они были оправданы, поскольку, сохраняя достоинства метода, был найден путь, как изжить исходно заложенные в нем негативы.

Главная проблема заключалась в том, что, поскольку люминесценция представляет собой весьма сложное явление, использовать ее как временной критерий можно лишь в случае ясного распознавания в минерале-дозиметре характера его ловушек. Принимая во внимание спорность имевшихся ранее, часто - неправдоподобных, датировок по разным минералам-дозиметрам, нужно было, прежде всего, выбрать из них тот, по которому ТЛ сигнал в плане его адекватности временному критерию расшифровывается наиболее надежно. Т.е., чтобы была уверенность в надежности его работы в качестве таймера.

Выявить характер ловушек в полевых шпатах крайне трудно, поскольку они представляют собой семейство минералов из почти двух десятков разновидностей. Причем часто эти разновидности сосуществуют в виде различных сростков даже в самых мелких песчинках - с очень сложным соотношением компонентов и примесей, что, собственно, и определяет большие трудности при распознавании природы ловушек в полевых шпатах и порождает при датировании по ним значительную неопределенность результатов.

Что касается центров захвата электронов в шпатах, их природа определяется небольшим содержанием примесей, включаемых в структуру силикатной основы шпатов. Установить точно природу этих примесей, а соответственно и характер ловушек очень сложно. Так что выявить среди шпатов конкретный часовой механизм крайне трудно даже при избирательном стимулировании выплеска люминесценции светом строго определенного спектра.

Однако достоинством полевых шпатов является то, что ловушки у них мелкие и легко отбеливаются, что позволяет использовать широкий набор отложений. Поэтому в связи с развитием лазерной техники, как раз и позволившей проводить стимулирование выплеска люминесценции светом строго определенного спектра - чтобы освободить целенаправленно мелкие ловушки, шпаты стали широко использоваться в технологиях ОСЛ.

Считается, что началось активное внедрение подобного подхода после публикации [*Huntly et al., 1985*] в журнале «Nature», хотя первой крупной обобщающей работой в плане применения методик ОСЛ стала монография Мартина Айткена [*Aitken, 1998*]. Следовательно, ОСЛ датирование является достаточно молодым методом возрастной диагностики четвертичных отложений.

Поскольку быстрое отбеливание шпатов позволяет работать практически с любыми, содержащими их отложениями, сегодня ОСЛ методу придается большое значение, особенно в плане возможности перехода на аппаратуру, позволяющую высвечивать лазерным лучом отдельные песчинки. Тем не менее, по отмеченным выше причинам точно оценивать характер и количество ловушек в шпатах сегодня еще не

представляется возможным. Выплеск стимулированной люминесценции в таких случаях может быть определен лишь на усредненном уровне - по совокупности импульсов из ловушек разных типов и в разных, сосуществующих минералах шпатового семейства, пусть и близких по структуре, что, собственно, и влечет за собой значительную неопределенность результатов. Иногда эти результаты правдоподобны, иногда - нет, причем соотношение первых и вторых нередко одного порядка, и из-за подобной неопределенности пока относиться к ОСЛ датировкам по полевым шпатам нужно осторожно.

В этом плане стоит отметить усилия эстонской научной школы, одной из старейших на поприще дозиметрического датирования и ныне возглавляемой известным исследователем А.Н. Молодьковым. Этот исследователь один из немногих проводит крайне трудоемкую процедуру выделения шпатов определенного вида и работает преимущественно с калиевыми шпатами, поскольку они имеют одну формулу -  $KAlSi_3O_8$ , представлены только тремя модификациями с разной степенью упорядоченности кристаллической решетки (ортоклаз, адуляр, микроклин), и в них легче распознать примеси.

Обычно в своей кристаллической решетке калиевые полевые шпаты могут удержать лишь незначительную примесь натрия, однако они почти всегда содержат тончайшие пластиночки-вроски натриевого шпата альбита. Выделить же калиевые шпаты в более-менее чистом виде можно только методом флотации в тяжелых жидкостях, и насколько непроста и трудоемка эта процедура можно судить, например, по тому, что плотность у разных силикатов очень близка. У кварца она составляет 2,6-2,65, альбита - 2,61-2,63, а у калиевых шпатов - 2,55-2,63, г/см<sup>3</sup>, т.е. шаговый переход тяжелых жидкостей во флотационном наборе должен отличаться по плотности в третьем, как минимум, знаке после запятой.

На наш взгляд, использовать ОСЛ датировки по шпатам целесообразно только в случае возможной их корректировки более надежными методами возрастной диагностики, однако делается это редко, что при интерпретации данных, собственно, и порождает горячие споры. В лаборатории А.Н. Молодькова как раз и сочетается ОСЛ датирование по максимально очищенным калиевым шпатам и ЭПР-ЭСР датирование, которым этот исследователь владеет в совершенстве. Но, повторим, это крайне редкий случай: так как обе используемые А.Н. Молодьковым процедуры требуют специального, весьма сложного технического оснащения, очень трудоемки и, соответственно, дороги, он один из немногих применяет оба метода одновременно.

В большей степени решение проблемы неопределенности датирования просматривается при ТЛ датировании, причем по кварцу. Поэтому вернемся к данному методу как наиболее отработанному способу люминесцентного датирования и рассмотрим его специфику более подробно.

### *ТЛ датирование по кварцу и его специфика*

Поскольку в нашем случае было решено уйти от отмеченных неопределенностей, как минерал-таймер стал использоваться только кварц. Кварц предпочтителен тем, что хорошо изучен, химически стоек, прочен, встречается практически во всех отложениях и, даже принимая разные обличья, выделяется простой, четко выраженной структурой. В кварцевой разновидности оксида кремния молекул как таковых нет. Будучи неорганическим полимером с формулой  $(SiO_2)_n$ , кварц отличается тем, что в любом его куске за счет химической вязи Si--O--Si образуется своеобразный пространственный каркас, и, в результате, такой кусок представляет как бы одну гигантскую молекулу.

Благодаря сказанному, характер ловушек у кварца распознается достаточно уверенно: главные из них стабильны, их глубина близка к энергии захвата в дырках валентной зоны, и опыты уже по тысячам образцов показывают: основной ТЛ выплеск привязан к температурам 150-450°C, с пиком при 300-350°C [Sheinkman, Shlukov,

[2001; Shlukov, Sheinkman, 2002, 2007]. Это позволяет, как минимум, постулировать, что, раз в молекуле  $(\text{SiO}_2)_n$  кислород является анионом, в отсутствие которого на его месте образуется сильный положительный электрический заряд, ловушки образуются в центрах с вакансиями по кислороду, и по разным причинам кварц рождается со строго определенным их числом. Ибо другие причины появления таких стабильных зарядов в ловушках большой глубины в кварце предположить трудно даже теоретически.

Нужно только учитывать, что отмеченные ловушки у кварца глубокие, а содержащий его мелкозем в четвертичных образованиях встречается большей частью в условиях отсутствия его обжига. Тогда как для переустановки на условный нуль под воздействием ультрафиолетовых лучей песчинки кварца должны пронизываться солнечным светом, как показали специальные эксперименты, по крайней мере, в течение нескольких дней.

Нашей целью было найти способ избавиться в люминесцентном датировании от сложных и дорогостоящих процедур, порождающих неопределенность результатов, и сделать, таким образом, эту технологию надежной, доступной по стоимости возрастных определений и позволяющей вести серийный отбор образцов. Для этого был осуществлен ряд экспериментов, поскольку возникла проблема интерпретации люминесцентного сигнала, используемого в качестве критерия возрастной оценки отложений.

Остановимся на этой проблеме подробнее. Вначале рассмотрим сначала принцип получения песчинкой кварца некоторой дозы радиации.

Находясь в составе некоторой толщи отложений, такая песчинка может быть под воздействием облучения как от источников радиации внутри этих пород, так и извне (рис. 6).

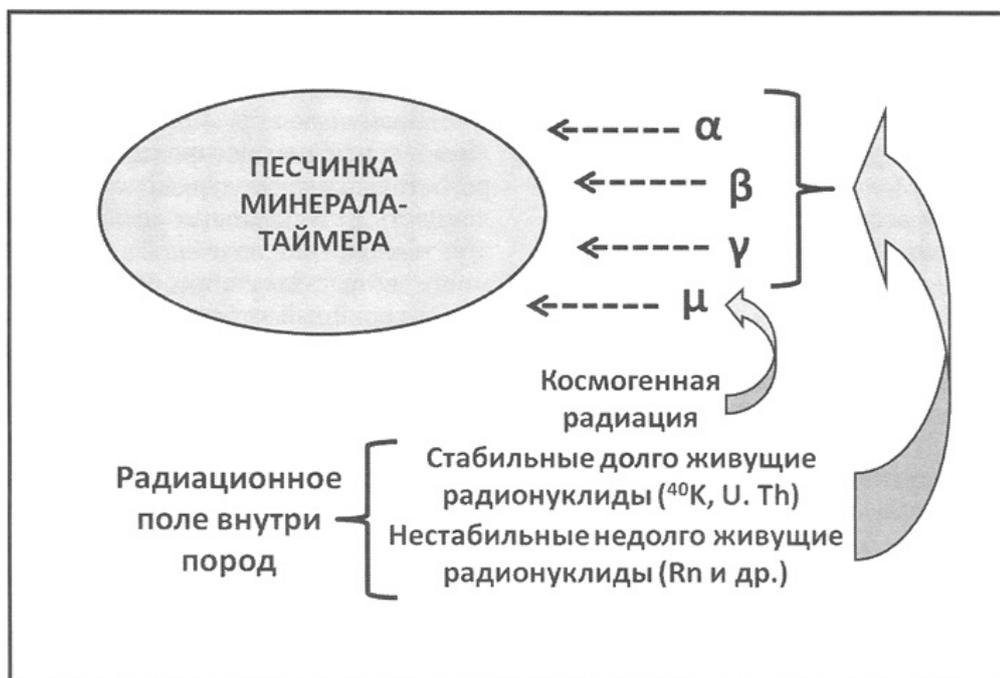


Рис. 6. Принцип облучения песчинки минерала-таймера.

Внешним облучением можно пренебречь - сильные радиационные источники вне пород появляются редко (если только не проводить исследования в зоне повышенной техногенной радиоактивности), а влияние солнечных и космических лучей ощутимо только у самой поверхности пород и нивелируется уже небольшой ее зачисткой (космогенные частицы распадаются у поверхности Земли на электроны, пробег которых всего несколько миллиметров; такого экрана хватает и для блокирования влияния солнечного света). Таким образом, принимать во внимание нужно только излучение радионуклидов внутри исследуемых пород - поток  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов.

Влиянием  $\alpha$ -частиц тоже можно пренебречь; они идентичны ядрам гелия, их пробег составляет лишь самые первые десятки микронов, а при очистке от примесей минералы обрабатывают кислотами, съедающими слой, в который могут проникнуть  $\alpha$ -частицы. Но  $\beta$ -излучение нужно учитывать - это тоже поток электронов, их пробег невелик, но источник излучения может оказаться рядом с песчинками минерала-таймера и он тогда будет воздействовать на них, ибо размер песчинок обычно меньше длины пробега электронов. Здесь возможно некоторое упрощение. Различные проведенные автором эксперименты и анализ литературных источников показывают, что соотношение  $\beta$  и  $\gamma$ -излучения в изучаемых породах довольно устойчиво (таблица), что позволяет вместо параллельного замера обоих типов излучения ограничиваться в полевых условиях замером только  $\gamma$ -излучения, вводя в расчеты поправочные коэффициенты, ибо разброс данных тогда обычно не превышает 10%.

Таблица. Расчет соотношения  $\beta/\gamma$  излучения по литературным данным

Излучение	Данные по [English et al. (2000)], $\mu\text{Gy/yr}$												Среднее
	$\beta$	3348	2103	1917	2510	2969	1771	1789	1652	2464	2191	2664	
$\gamma$	2897	1744	1563	1924	2461	1365	988	937	1930	1628	1864	1668	
$\beta/\gamma$	1.16	1.21	1.23	1.36	1.21	1.3	1.81	176	1.28	1.35	1.43	1.58	
	Данные по [Porat et al., 1997], $\mu\text{Gy/yr}$												
$\beta$	676	1334	757	1429	702	835	976	1022	886	1257	681		1.37
$\gamma$	520	886	579	942	517	639	775	827	632	810	510		
$\beta/\gamma$	1.3	1.51	1.31	1.52	1.36	1.31	1.26	1.24	1.4	1.55	1.34		

Главная роль в облучении минерала-таймера принадлежит  $\gamma$ -квантам, поскольку их влияние распространяется на значительном расстоянии от источника излучения - они отдают свою энергию валентным электронам и возбуждают их на 1,2-1,5-м, в среднем, треке своего пробега в толще породы. Это влияние нужно учитывать очень тщательно. Обычно такой учет проводится инструментально, прямым замером активности радиационного поля в блоке изучаемых пород параллельно выяснению соответствия осадков другим методическим правилам дозиметрического датирования.

Таким образом, допуская, что в течение года активность радиационного поля будет постоянной, после замера этой величины инструментально выходят через ее значение на главный показатель - годовую дозу поглощения радиации минералом-дозиметром. Тогда, считая, что величина стимулированной затем люминесценции адекватна поглощенной дозе, можно перейти к расчету времени пребывания минерала-дозиметра в породе. Напомним только, что в отличие от применяемых в ЭПР-ЭСР методе карбонатов среди используемых в ТЛ датирования силикатов нет новообразований, и они перед захоронением обязательно должны быть отбелены.

Эта кажущаяся простота сути ТЛ датирования - камень преткновения, о который часто спотыкаются исследователи. Пользователи датирования - из-за недоучета ими специфики метода, а его разработчики - из-за того, что оказались весьма устойчивы стереотипы, сформировавшиеся на заре создания метода, не учитывающие раскрытые впоследствии тонкости механизма ТЛ процесса. Главных проблем две. Первая связана с правилами пробоотбора.

Как и над всеми другими методами возрастной диагностики отложений, на заре становления метода ТЛ датирования над ним довлели традиции простоты пробоотбора, унаследованные из опыта радиометрических методов. Тогда допускался упрощенный тип отбора образцов - без инструментального замера радиации в толще пород и на небольшой глубине - всего 30-40 см от поверхности или даже слегка зачистив ее [Aitken, 1985; Luminescence and ..., 1997; Wagner, 1998]. Считалось: главное - закрыть от света место отбора образца и отправить его в светонепроницаемой бумаге в лабораторию, где по содержанию в образце радионуклидов рассчитают интенсивность его облучения и по

выплеску люминесценции - поглощенную им дозу радиации, а затем, моделируя процесс облучения, и временную компоненту.

Подобная процедура вызывала сомнение уже при создании автором первой в Сибири установки ТЛ датирования - еще в 1980-х гг., но для выяснения ситуации требовалось провести ряд экспериментов. В нашем случае правила отбора образцов было решено установить опытным путем, поскольку без решения этой проблемы нельзя было уверенно проводить датирование объектов. Во избежание случайных датировок в исследованиях автора был также введен статистический контроль результатов - с внедрением серийного, вместо обычно используемого единичного, отбора образцов. Уже это потребовало кардинальных методических изменений - разработок техники и приемов, направленных на обработку большого количества образцов, раньше просто не существовало.

Как было показано выше, поле облучения образца формируется в блоке пород радиусом 1,2-1,5 м - с учетом величины пробега  $\gamma$ -квантов. Если бы учитывалось только  $\beta$ -излучение, то пробоотбор можно было проводить на небольшой глубине. Но поскольку главное воздействие оказывает на минерал-таймер  $\gamma$ -излучение, и пробег его квантов в толще пород в среднем составляет 1,2-1,5 м, то именно в центре шара с таким радиусом и должен быть отобран образец. Добавим, что учесть распределение в данном блоке пород радионуклидов нереально, поскольку они разбросаны в нем беспорядочно, как нереально и взять, как пробу, весь такой блок пород в целом (он весит несколько тонн). Поэтому и замер интенсивности облучения образцов должен проводиться в центре такого блока. Причем активность радиационного поля должна измеряться инструментально, *in situ*, а не посредством расчета по содержанию радионуклидов в образце - ведь образец облучается не из одной точки, где взят образец, а полем всего блока, т.е. в пределах шара диаметром, как минимум,  $> 2$  м (рис. 7).

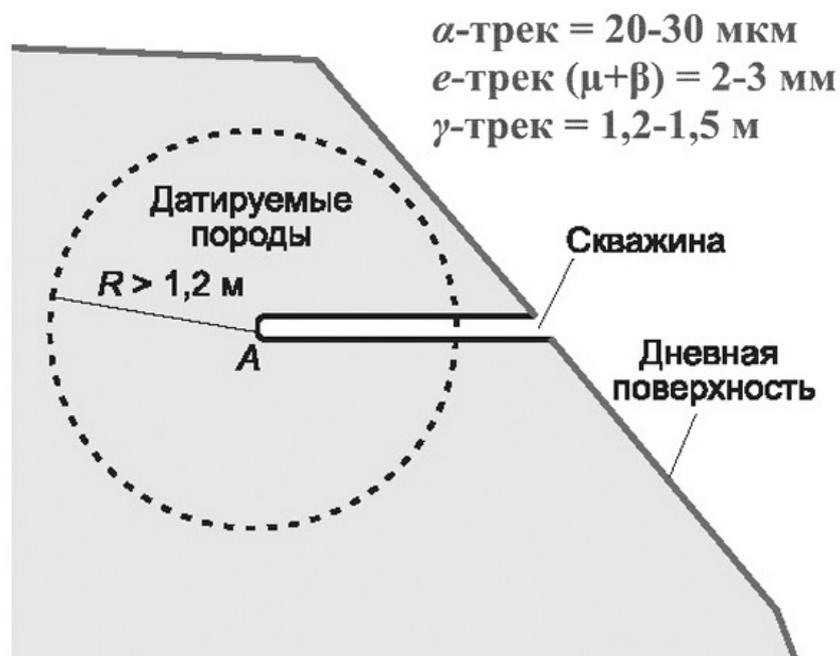


Рис. 7. Принцип пробоотбора в ТЛ датировании

Стереотипы, однако, устойчивы, и хотя физическая сущность данного подхода, казалось бы, ясна, ряд исследователей продолжает использовать упрощенный отбор образцов. Однако после выяснения, насколько это правомерно, в результате проведенных автором соответствующих экспериментов, полученный им вывод был однозначен: упрощенный подход порождает разброс полученных посредством его данных порой на

десятки процентов. И поскольку эти данные включаются, как дозиметрические характеристики образца, в расчет дозы радиации, поглощенной минералом-таймером, соответственно искажается и возрастное определение. Принимая все это во внимание, автором был обобщен опыт выбора датируемых осадков для возрастной диагностики посредством ТЛ метода и разработан принцип пробоотбора. Схематически все это отображено на рис. 8.

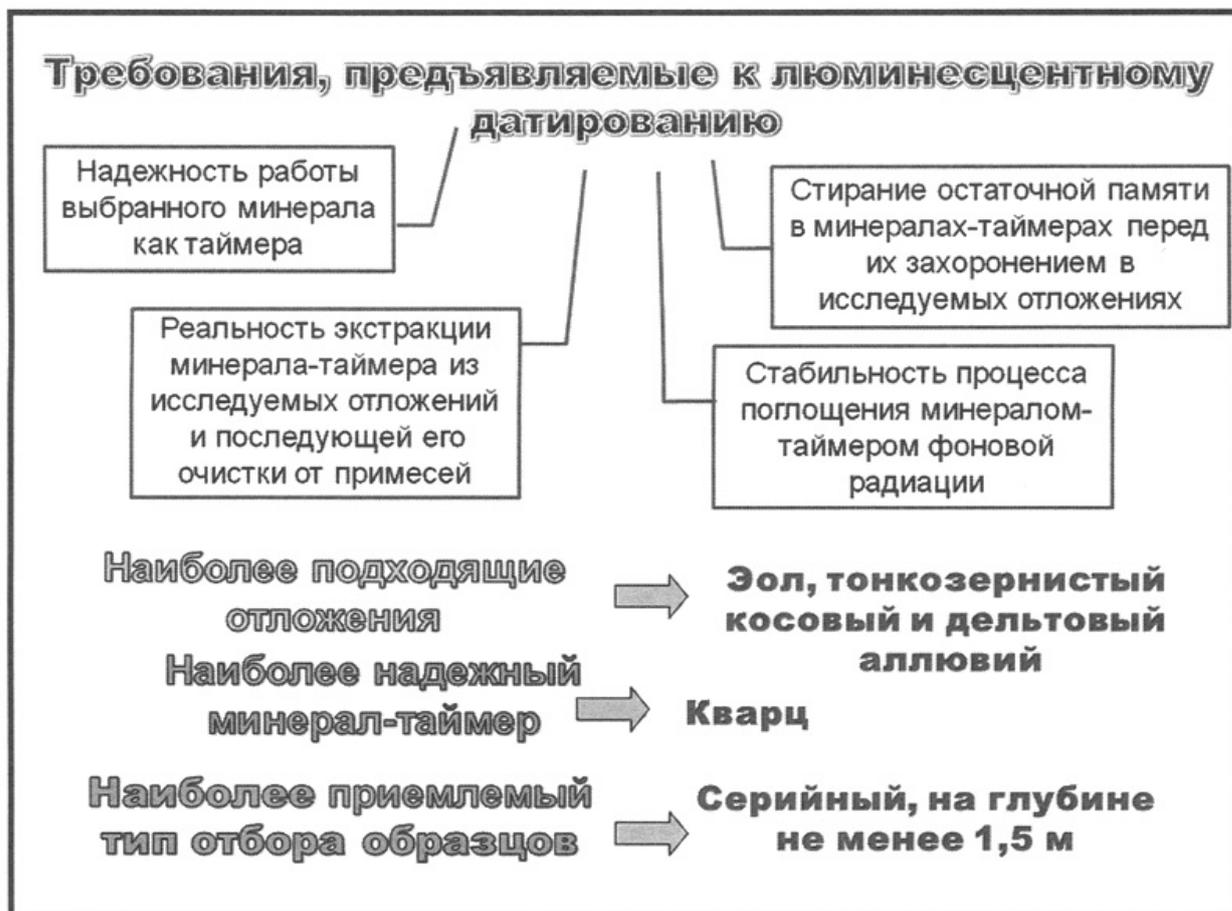


Рис. 8. Требования, предъявляемые к люминесцентному датированию

Вторая из упомянутых проблем касалась выбора процедуры оценки энергии, накапливаемой минералом-таймером на ловушках. Уже было известно [Матросов и др., 1979; Shlukov et al., 1993], что в прежней процедуре есть просчеты. Поскольку она была весьма трудоемка, статистический контроль датировок на основе серийного отбора образцов делался в ней редко, и вопрос о валидности возрастных определений встал только тогда, когда накопилось большое количество явно неправдоподобных датировок. Нужно было разобраться в ее сути, и на это тоже потребовалось время.

Общая схема процесса, отражающего ТЛ датирование по кварцу показана на рис. 9.

На этой схеме видно, что, рождаясь с определенным количеством ловушек электронов, возбужденных внешней радиацией, кристалл кварца способен накапливать такие электроны, а при определенном подводе тепла электроны освобождают ловушки с выплеском света, и нужно лишь измерить величину возникающей люминесценции и смоделировать процесс ее выплеска для расчета возраста содержащих минерал-таймер пород. Но как раз в методике моделирования процесса и была заложена суть проблемы.

Выплеск стимулированной термическим способом люминесценции из глубоких ловушек кварца ясно распознается по пику свечения при температуре 300-350° (рис. 10). Другие его ловушки имеют подчиненное значение - они мелкие, обусловлены примесями

и опустошаются при значительно меньших температурах. Иными словами, энергия, запасенная электронами на глубоких ловушках кварца и освобождаемая при нагреве, может быть четко зафиксирована, а эквивалентный ей ТЛ импульс ассоциирован с конкретным типом ловушек.

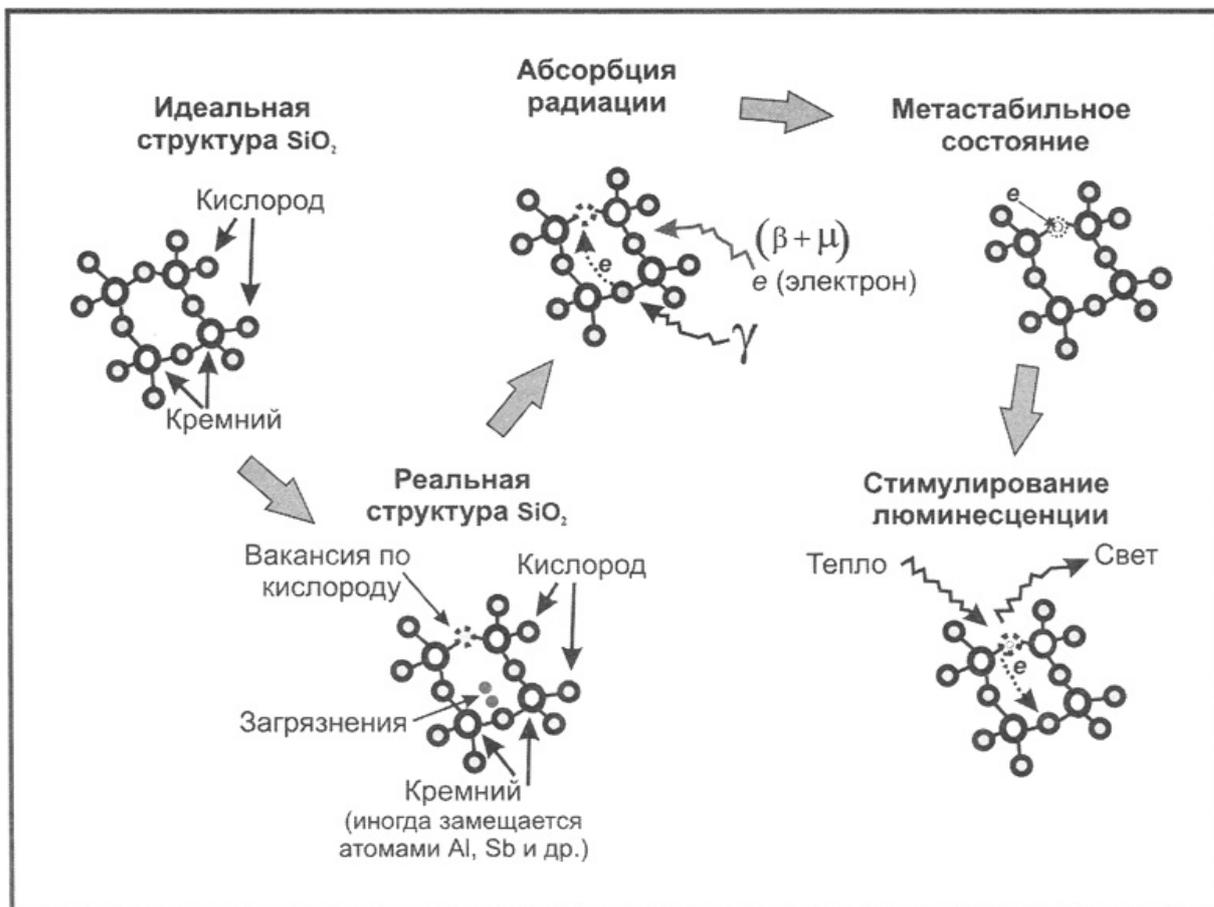


Рис. 9. Схема физических процессов как основы ТЛ датирования – пояснения в тексте.

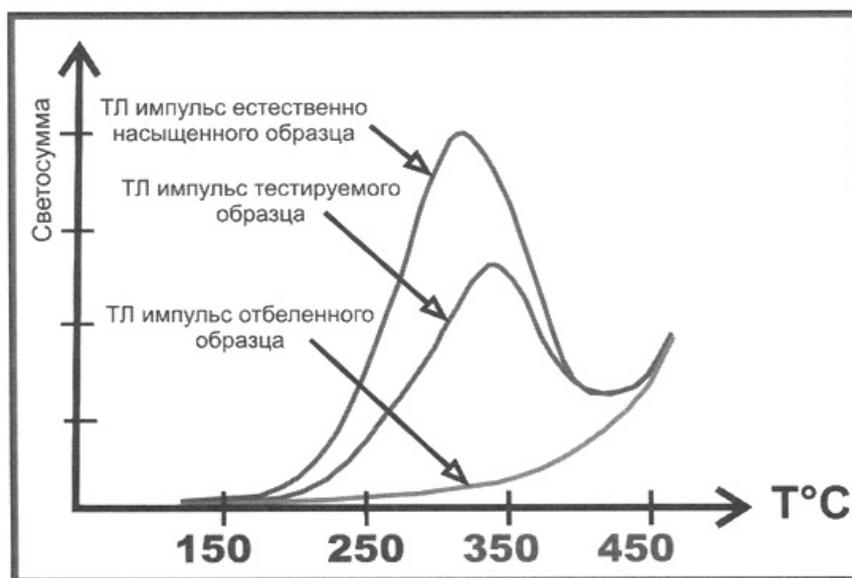


Рис. 10. Графики основных используемых для расчета возраста ТЛ импульсов

Следовательно, в соответствии с общими принципами датирования для получения возрастного определения нужно смоделировать процесс накопления возбужденных электронов ловушках кварца и иметь расчет по соотношению ТЛ импульсов из образцов в типичных состояниях, т.е. образца, максимально поглотившего энергию облучения, отбеленного образца и тестируемого (рис. 10).

Выйти на отбеливание, как на условный нуль - получение образцов с минимально возможным содержанием в них прогенетической памяти, просто: нужно лишь специально обработать навеску тестируемого образца мощным потоком ультрафиолетового света. Практика показывает, что для этого достаточно воздействие в течение нескольких часов обычной лампы-излучателя с ультрафиолетовым свечением мощностью в несколько сот ватт. Серия специально проведенных экспериментов ясно продемонстрировала, что такое усиленное ультрафиолетовое облучение образцов в лаборатории адекватно по результату их облучению при выставлении на солнечный свет в течение нескольких дней.

Однако усиленное лабораторное радиоактивное облучение тестируемых образцов, используемое для получения образцов, насыщенных энергией радиации, оказалось неоправданным. Как оказалось, именно в нем была заложена причина последующих расчетов явно неправдоподобных возрастных определений.

Насыщение образцов энергией радиации ускоренно - в поле искусственного облучения высокой интенсивности - проводилось в прежней процедуре обработки образцов традиционно. Но специальные эксперименты показали, что идущая несколько дней радиоактивная обработка образцов, в поле с высокой интенсивностью облучения, и облучение природное, в слабых радиационных полях, длящиеся тысячи лет, несопоставимы по воздействию на минерал-дозиметр. Причина - выявленный экспериментально [Shlukov, Sheinkman, 2002, 2007] второй порядок кинетики ТЛ-процесса, а не первый, исходно принятый теоретически в традиционной технологии - согласно ему производились ранее расчеты, искажая датировки.

Кратко поясним, о чем идет речь. Кинетика люминесценции - учение о законах возгорания и затухания свечения в минералах-люминофорах. Его суть, определяемая вероятностями захвата и освобождения в них электронов. Это очень сложное явление, поэтому рассмотрим его здесь лишь схематически.

В простейшем случае, когда пренебрегается временем процесса, кинетика люминесценции описывается экспоненциальным законом (1), а при рекомбинационной люминесценции (как в нашем случае) в широком диапазоне времени кинетика затухания люминесценции аппроксимируется гиперболой Беккереля (2) [Фок, 1964; Антонов-Романовский, 1966; Физическая..., 1990]:

$$I = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

$$I = I_0 / (1+pt)^a \quad (2)$$

где:  $I$  и  $I_0$  - интенсивности люминесценции соответственно в начальный момент времени и через время  $t$ ;  $\tau$  - коэффициент Эйнштейна, характеризует среднее время возбужденного состояния электронного ансамбля,  $p$  - константа, отражающая структурные особенности кристалла;  $a \leq 2$  - величина, отражающая порядок кинетики, соответственно равная 1 и 2 при первом и втором порядке кинетики.

Важно понять, что при первом порядке кинетики величина  $t$ , отражающая время возбужденного состояния электронов, относительно мала - люминесценция быстро разгорается и быстро гаснет, т.е. электроны быстро освобождают ловушки и возвращаются на валентные оболочки.

График ТЛ-импульса в модели первого порядка будет островершинный: в области нарастания люминесценции практически большая его часть зеркальна области затухания, или даже график спада люминесценции будет круче графика ее нарастания. Теоретически это определяется отсутствием возможности повторного захвата электронов (рис. 11).

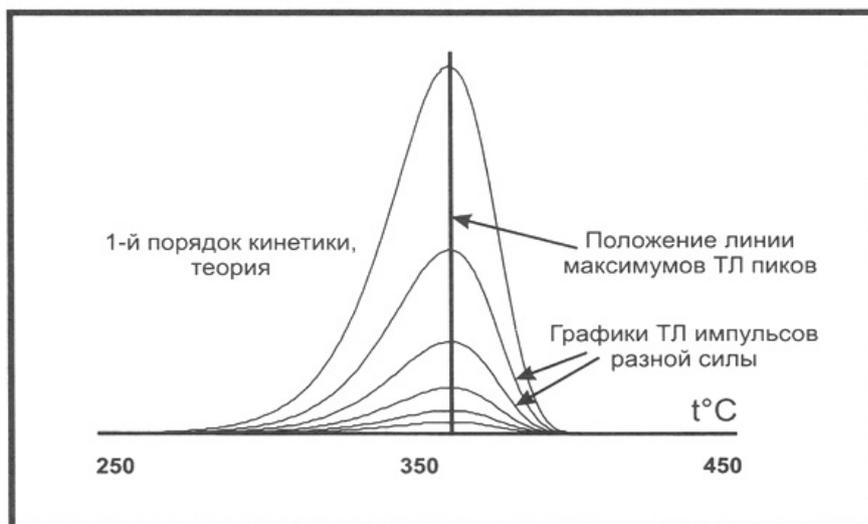


Рис. 11. Графики ТЛ импульсов по кварцу при первом, согласно теории, порядке кинетики ТЛ процесса – пояснения в тексте.

Но при втором порядке кинетики время метастабильного состояния электронного ансамбля относительно велико, и даже если люминесценция разгорается быстро, ее затухание будет затянуто, ибо становится реальным повторный захват электронов соседними ловушками и повторное освобождение последних. В итоге график ТЛ-импульса в области высоких температур будет удлиннен и выположен (рис. 12).

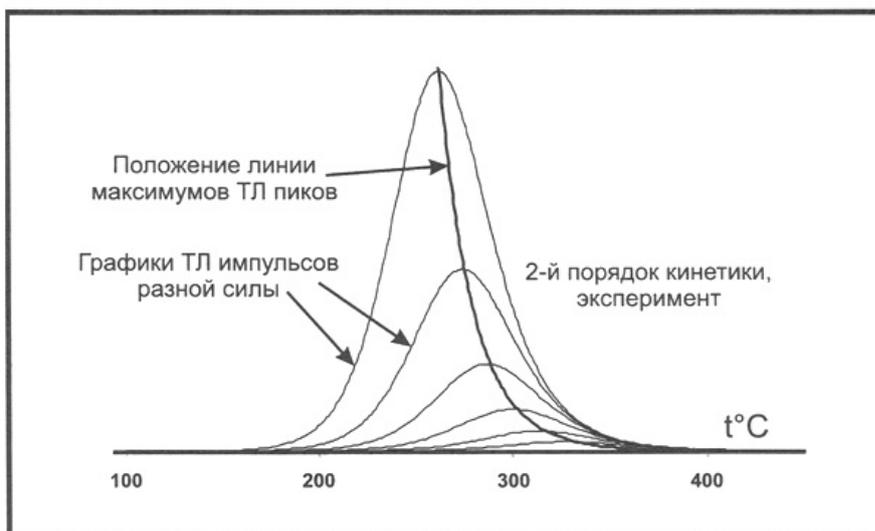


Рис. 12. Графики ТЛ импульсов по кварцу при втором, установленном экспериментально, порядке кинетики ТЛ процесса – пояснения в тексте.

Отсюда должен быть иным, соответственно, расчет интенсивности люминесценции. Согласно приведенным выше формулам, при кинетике первого порядка ( $a = 1$ ) между интенсивностью свечения и временем метастабильного состояния электронов наблюдается прямая зависимость (с некоторым коэффициентом), а при втором порядке ( $a = 2$ ) - степенная.

Разница существенна. Но в прежней технологии модель ТЛ-процесса с кинетикой первого порядка, будучи исходно положенной в основу, стала фактически канонизированной. В ней суммарная величина люминесценции просто фиксировалась и не детализировалась, так что расчет ее параметров по законам кинетики первого порядка стал в последующем причиной искажения возрастных определений.

Для выявления порядка кинетики нужен тщательно проводимый эксперимент; многократно повторенные опыты с кварцем из самых разных районов в нашем случае показали, что при детальной фиксации ТЛ-сигнала затягивание процесса в области высоких температур ясно выражено (рис. 12). Из чего следовало: поскольку стереотипом традиционной технологии стала трудоемкая процедура постепенного насыщения образцов, помещая их в искусственное радиационное поле, нужно кардинально менять и суть работы с образцами, и принципы ТЛ-датирования, переходя к расчетам по второму порядку кинетики.

Может возникнуть вопрос, который геологи часто задают автору: а зачем нам все это знать и вдаваться в такие детали процесса, не лучше ли физикам самим разобраться в этом вопросе? Дело в том, что физикам суть процесса давно известна, а в задачи прикладного характера они далеко не всегда вникают детально. Тогда как в датировании именно эти детали имеют огромное значение, поскольку от них зависит процедура и точность возрастных определений.

Для лучшего осознания этого обратимся еще раз к классической теории термолюминесценции минералов-кристаллофосфоров. Характер элементарных ТЛ пиков вначале был обоснован теоретически (пиками обычно называют ТЛ сигналы из-за их соответствующего вида на графике процесса). Для первого порядка кинетики он описывался известной формулой Рэндала-Уилкинса [Randall & Wilkins, 1945]:

$$J(T) = nw_0 \exp(-\varepsilon / kT) \exp\left(-\frac{w_0}{\rho} \int_{T_0}^T \exp(-\varepsilon / kT) dT\right)$$

а для второго порядка - другой известной формулой: одного из классиков отечественной школы люминесценции Антонова-Романовского [Антонов-Романовский, 1966]:

$$J(T) = \frac{\sigma_r n^2 w_0}{\sigma_t N} \exp(-\varepsilon / kT) \left(1 + \frac{\sigma_r n w_0}{\sigma_t N \rho} \int_{T_0}^T \exp(-\varepsilon / kT) dT\right)^{-2}$$

где  $N$  и  $n$  - соответственно количество ловушек и захваченных на них электронов;  $w_0$  - частотный фактор;  $\varepsilon$  - энергия активации освобождения захваченных электронов из центров захвата (энергетическая глубина ловушки);  $\sigma_r$  и  $\sigma_t$  - сечения реакции радиационного освобождения электрона и его последующей рекомбинации на валентную оболочку;  $T$  - абсолютная температура;  $p$  - скорость нагрева;  $k$  - константа Больцмана.

Отражаемые этими формулами закономерности и процессы известны давно, и если графически отобразить заложенные в формулах зависимости, как раз и получим графики, аналогичные тем, что представлены на рис. 11 и 12. Вопрос лежит в плоскости того, как использовать раскрытые закономерности в прикладных целях. Как видим, верхние части ТЛ пиков рис. 11 и 12 похожи, и если бы можно было получать возрастное определение только по величине сигнала из тестируемого образца, с определенной долей допустимости различиями можно было бы пренебречь, действительно оставив разбираться в деталях физикам. Но, подчеркнем еще раз, именно эти детали имеют в ТЛ датировании принципиальное значение. Суть в процедуре прежней технологии, которая опиралась только на теоретическую модель ТЛ процесса, в которой исходно, еще на заре датирования, был принят для расчетов более простой, первый порядок кинетики.

Ранее тестируемый образец делился на аликвоты (равные навески), которые искусственно облучались с нарастающей, для каждой последующей аликвоты, высокой интенсивностью. По точкам величины поглощенной дозы в аликвотах экстраполировалась (рис. 13-1) дозная кривая (представляющая собой экспоненту насыщения), и по положению на ней точки, соответствующей испытываемому образцу, вычислялся его

возраст (рис. 13-II). Ибо теоретически считалось, что стимулированная подобным образом люминесценция отражает ТЛ-сигнал с кинетикой первого порядка - не осложненный инверсиями.



Рис. 13. Принцип традиционной технологии ТЛ датирования – пояснения в тексте

Однако проведенные сначала в 1970-х гг., а затем специально повторенные в процессе наших работ исследования [Матросов, Погорелов, 1978; Матросов и др., 1979; Shlukov et al., 1993; Sheinkman, 2002, 2007], показали следующее. Ускоренное искусственное облучение в полях, самое слабое из которых на порядки сильнее фоновых полей в толще исследуемых пород, по конечному результату не соответствует реальности в этой толще (рис. 14), поскольку искусственное облучение высокой интенсивности порождает инверсии электронного ансамбля, пробуждая множество «спящих» в обычных условиях мелких ловушек.

Пробуждение мелких ловушек, как результат искусственного облучения, приводит к тому, что на начальном участке дозной кривой вместо ее монотонного роста может происходить инверсионный спад (рис. 14), так как свободные электроны, отражая второй порядок кинетики ТЛ процесса, на некоторое время задерживаются в появившихся мелких ловушках. Через какое-то время электроны все равно покинут мелкие ловушки, так как они стремятся занять устойчивое положение в глубоких ловушках или вернуться на валентную оболочку, т.е. после снятия высокоинтенсивного облучения «проснувшиеся» ловушки рано или поздно возвращаются в «спящее состояние». Но в природе на это могут уходить годы, чего в лабораториях, конечно, не дожидаются. Тогда как точно вычислить, какие «спящие» ловушки просыпаются в конкретной ситуации, и как она реально отражается в полученных расчетах, в данном случае практически невозможно. Ибо

глубокие ловушки определяет структура самого кристалла, а мелкие - примеси, фиксировать которые по тому, как они ведут себя в конкретном случае и когда проникают в кристалл, пока реальных инструментов нет.

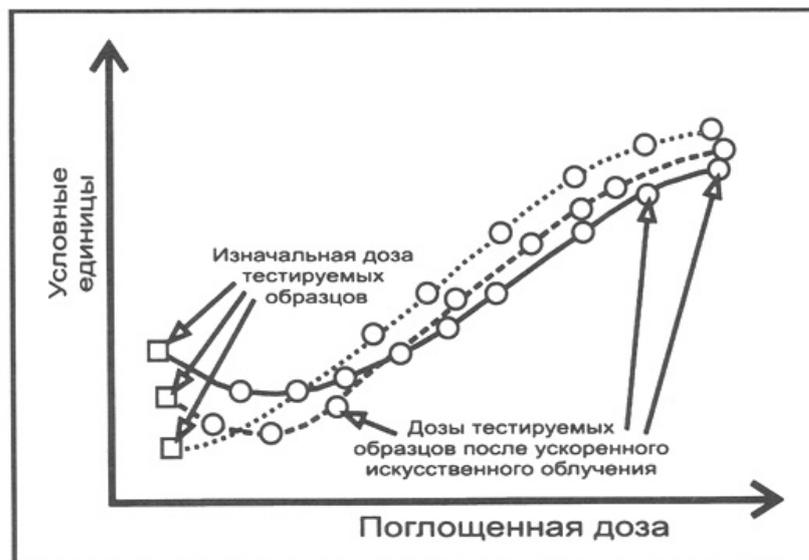


Рис. 14. Реальное искажение теоретической модели ТЛ процесса после искусственного радиоактивного облучения образцов – пояснения в тексте.

Иными словами, насыщение минерала-дозиметра в слабых фоновых естественных полях в течение тысяч лет, и ускоренное лабораторное - в сильном радиационном поле в течение дней - не адекватно друг другу и эта неадекватность не поддается коррекции. Тем более что процедура искусственного облучения дорога, аликвот обычно использует мало, и это не позволяет корректировать экстраполируемые датировки, распознавая искаженные участки (рис. 14) дозной кривой.

Автор специально останавливается на деталях такого рода, ибо они должны быть осознаны исследователями, использующими результаты ТЛ датирования. К тому же, в отмеченной процедуре оценивают усредненный общий ТЛ-выплеск - обычно используя метод усреднения его вершин и впадин с переходом на высоту виртуального плато. Не обращается в ней внимания и на оптические свойства образца, а проведенные эксперименты [Перевалов и др., 2009; Sheinkman, 2002; Shlukov, Sheinkman, 2002, 2007] выявили, что и эти свойства влияют на выход люминесценции; у разных образцов они различны, так что в совокупности вся усредненность явно искажает результаты. Таким образом, в конечном варианте итог датирования по прежней процедуре может давать неправдоподобные результаты, искажая датировки кратно.

Тем не менее, и после опубликования материалов, освещающих проблемы прежней процедуры, в том числе представленных на ряде недавних конференций высокого ранга [Шейнкман и др., 2009, 2011; Shlukov, Sheinkman, 2002, 2007; Sheinkman et al., 2011], пользователи традиционной методикой не стали менять ее сути. За рубежом, где сосредоточено большинство лабораторий ТЛ датирования, по-прежнему идут путем инженерного решения проблемы - внесения последующих корректив с помощью добавочной аппаратуры. Нужно учесть и то, что создание этих лабораторий было нацелено на получение результатов датирования на основе первого порядка кинетики ТЛ процесса, и кардинально изменить в них подход означает провести новые дорогостоящие эксперименты и вложить много средств в новую аппаратуру. Судя по публикациям и докладам на конференциях, пока в традиционной ТЛ хронометрии для кардинального изменения позиции видимо еще не пришло время, ввиду чего исследователи не меняют традиционную процедуру, внедряя упомянутое инженерное решение.

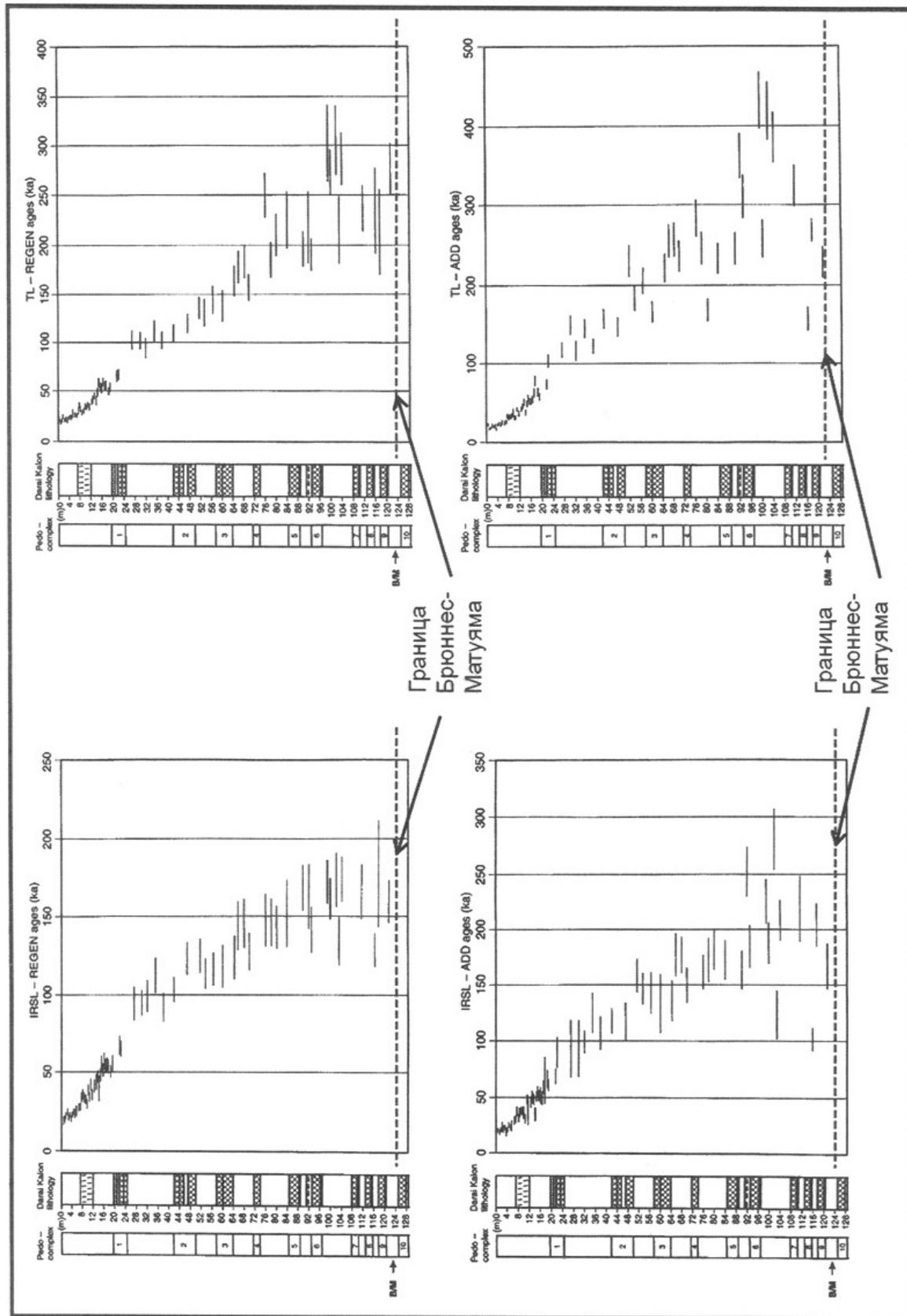


Рис. 15. Появление неправдоподобных датировок, получаемых посредством традиционной технологии ТЛ и ОСЛ датирования по [Friesen, Dodonov, 1998] — пояснения в тексте.

Возникает, правда, в таком случае, вопрос: почему бы исследователям, использующим прежнюю методику, просто не протестировать ее, сняв целый ряд дискуссионных вопросов посредством проведения эксперимента аналогично тому, что отображен на рис. 14. Ответ очевиден: осуществление экспериментов такого рода обходится очень дорого. В нашем случае они были проведены, опираясь, прежде всего, на энтузиазм исследователей в России. Чтобы получить, например, результаты, как на рис. 14, нужна многочасовая работа на атомном реакторе, каждый час которой требует немалых средств, а в нашем случае она была сделана на паритетной основе параллельно с экспериментами операторов реактора.

Хотелось бы затронуть еще один аспект проблемы, касающийся искаженных датировок, получаемых по прежней технологии. Их не любят афишировать. Тем не менее, некоторыми исследователями такие данные приводятся - показывая реальность искажения результатов по традиционной методике ТЛ и ОСЛ датирования. Например, они представлены М. Фрехеном - известным специалистом в области люминесцентного датирования. На рис. 15, в частности, представлены копии основных выкладок из статьи [Frechen, Dodonov, 1998], где видно, что в лессах (лучшие осадки для данного типа датирования) полученные по традиционной методике ТЛ и ОСЛ датировки у границы Брюннес-Матуяма дали возраст лишь в 150-200 тыс. лет - т.е. искаженный вчетверо.

Поскольку в нашем случае целью было создать надежный, недорогой и, по возможности, простой, позволяющий работать с большим количеством образцов метод, от неопределенности и трудоемких процедур прежних технологий ТЛ датирования было решено отказаться. Но вначале не менять аппаратуру для фиксации ТЛ сигнала.

Опираясь на второй порядок кинетики термической люминесценции у кварца, как промежуточный вариант в качестве насыщенного эталона в наших исследованиях стал использоваться не искусственно облученный кварц, а образцы, взятые из осадков, заведомо поглотивших максимальную дозу радиации. Например, из тех, что подстилают комплекс квартера.

При проведении исследований на Алтае был использован кварц из неогеновых отложений такого рода, а на Русской равнине и в районе Мертвого моря - из меловых осадков. Сравнивая их по величине ТЛ выплеска с датируемыми и отбеленными образцами, это позволяло рассчитывать возраст по упрощенной процедуре и дало хороший результат [Шлюков и др., 1990, Шейнкман, 2002; Шейнкман и др., 2009, 2011; Sheinkman, 2002, 2011].

Однако, несмотря на позитивные результаты, этот более простой, чем в традиционной процедуре ТЛ датирования подход было решено законсервировать, применяя его только в особых случаях. Основных причин две.

Во-первых, представительные разрезы пригодных для ТЛ датирования четвертичных отложений, подстилаемые пригодными для использования более древними осадками, встречаются редко. Во-вторых, оказалось, что насыщенные эталоны могут использоваться сугубо регионально, поскольку кварцевый мелкозем в образцах из разных районов порой совпадал по оптическим свойствам, но порой отличался, в результате чего высота соответствующих ТЛ пиков имела разную высоту.

В нашем распоряжении были образцы кварца из самых различных источников. В результате было выяснено, что каждый образец, так или иначе, обладает своей индивидуальной функцией роста (дозная функция) световой энергии люминесценции с ростом поглощенной дозы (рис. 16).

Детальные исследования показали, что причина подобной индивидуальности - микропримеси, которые порой кардинально меняли оптические свойства кварца. Причем иногда природа преподносила своеобразные сюрпризы. Например, на Русской равнине долгое время в наших исследованиях в качестве насыщенного эталона использовался очень чистый кварцевый песок мелового возраста из карьера у пос. Лыткарино Московской области. Когда ТЛ выплеск из этого эталона были сравнены с аналогичными выплесками по песку из юрских и меловых песчаников в разрезах, расположенных в

различных частях пустыни Негев, оказалось, что все они практически идентичны (рис. 17). Мало, того амплитуда ТЛ пиков в этом случае была порой на треть больше, чем в образцах по Сибири.

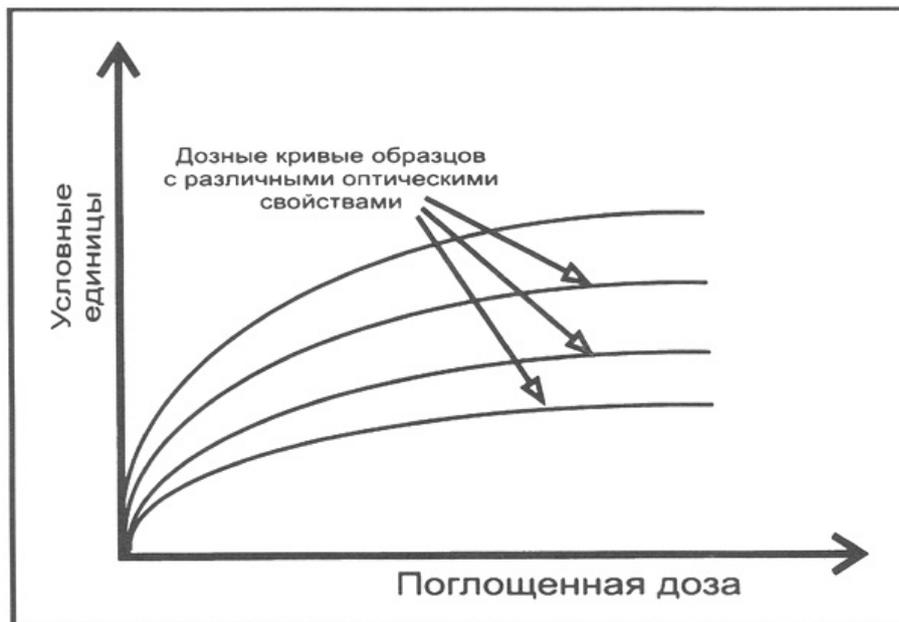


Рис. 16. Дозные кривые насыщения образцов кварца с разными оптическими свойствами

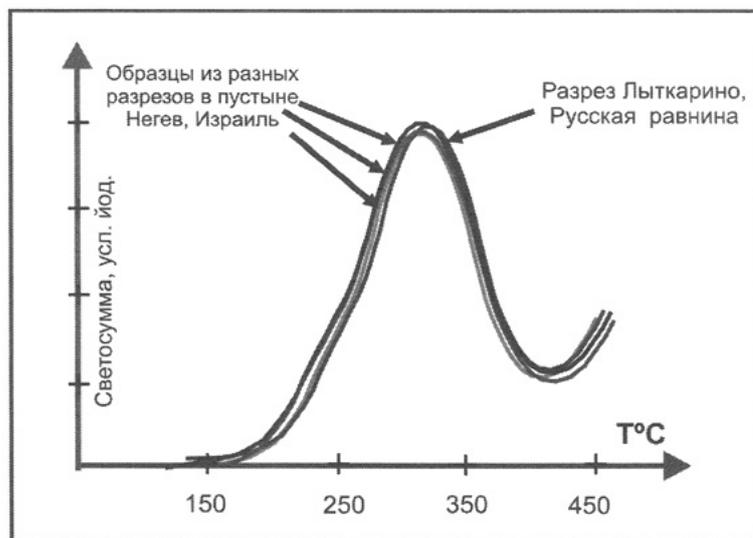


Рис. 17. ТЛ пики из насыщенных эталонов Русской равнины и пустыни Негев

Тем не менее, зная о том, в наших исследованиях продолжают изучаться насыщенные эталоны из разных объектов, однажды коллеги принесли образцы из разрезов в Воронежской области, которые оказались настолько чистыми, что амплитуда ТЛ пика в них почти в полтора раза была выше, чем в Лыткаринском и Негевских эталонах.

После этого было окончательно признано, что найденное, казалось бы, решение вопроса по упрощению и совершенствованию процедуры ТЛ анализа имело сугубо региональное применение. Как модификация ТЛ метода - она была названа автором «метод региональных эталонов» - этот подход работает неплохо [Шейнкман, 1995, 2002; Sheinkman, 2002], но хотелось снять региональные ограничения, и поиск новых подходов

был продолжен, опираясь на исследования, осуществляемые на основе научных грантов, полученных за рубежом.

Точкой приложения стали известные разрезы четвертичных отложений в котловине Мертвого моря - ранее детально датированных по радионуклидам урановой серии [Stein et al., 1997], что позволяло сразу проводить тестирование получаемых результатов. После проведения необходимых экспериментов был выявлен более надежный критерий расчета возраста - не сам выплеск люминесценции, а координаты его пика на кривой термического высвечивания [Sheinkman, Shlukov, 2001; Shlukov, Sheinkman, 2002, 2007]. Этот критерий обусловлен намного более стабильными, чем оптические свойства, температурными характеристиками кварца. В исходной модели первого порядка кинетики он не учитывался, поскольку для его распознавания требовались иная аппаратура и иная постановка задачи, чем в традиционной процедуре.

Многokrатно повторенные в ходе нашего эксперимента опыты показали: выбранный путь верен. Ибо данные эксперимента ясно продемонстрировали, что чем моложе образец (рис. 12), тем ниже пик его ТЛ выплеска и тем больше он сдвинут в область высоких температур. Диапазон таких сдвигов составляет более 100°C, что вполне достаточно для получения точных дат, и чтобы отличать эту технологию датирования от других, данная разновидность ТЛ анализа была названа *пиково-температурным методом*.

Итак, переход на принципиально иные принципы ТЛ датирования стал возможен благодаря определенным предпосылкам. Концентрированно их можно сформулировать следующим образом.

Во-первых, ТЛ процесс у кварца подчинен, как было установлено экспериментально, а не постулировано, второму порядку кинетики. В этом случае максимум элементарного ТЛ пика смещается в сторону более низких температур с увеличением числа захваченных электронов, а кривая тренда максимума пика является самостоятельной дозой кривой.

Во-вторых, световая энергия ТЛ выплеска несет вторичную информацию. Первичное же мерило - число захваченных в ловушках электронов, возбуждение которых (тепловое, световое) ведет к их освобождению и при последующей рекомбинации - к излучению квантов света, которые и должны улавливаться регистрирующей аппаратурой. Но некоторая доля квантов поглощается кристаллом в зависимости от его оптической прозрачности, меняющейся под влиянием микропримесей, степени дефектности и прочих показателей, связанных с условиями образования и последующего окружения минерала. Это определяет у образцов трудно учитываемую индивидуальность роста световой энергии люминесценции. Поэтому в новом подходе от такого мерила поглощенной дозы отказались, заменив его температурой максимума элементарного пика ТЛ, поскольку тепловые свойства минерала зависят от основной кристаллической матрицы, и, поэтому температурная дозовая функция во много раз стабильнее ее оптического аналога.

В-третьих, при втором порядке кинетики дозовая зависимость представляет собой тангенциальную функцию насыщения, когда уровень насыщения определяется динамическим равновесием между захватом электронов и их утечкой. Поскольку и захват, и утечка определяются единым агентом - радиационным воздействием, плотность захваченных электронов при насыщении является параметрической константой.

В-четвертых, отбеливающее воздействие солнечного ультрафиолета происходит по полной аналогии с радиоактивным облучением. При этом имеет место и освобождение захваченных электронов, и их захват. В конечном наступает динамическое равновесие, и плотность электронов в этом случае также является параметрической константой и отражает теоретически обнуленное состояние минерала-хронометра.

Исходя из сказанного, коллегой автора в совместных исследованиях А.И. Шлюковым, физиком по специальности (ушедшим, к сожалению, недавно из жизни), были разработаны [Шлюков, 2005] базовые расчетные формулы:

$$v = \left( \frac{T_{\infty}}{T} \right)^2 \exp(\varepsilon/k(1/T - 1/T_{\infty})) \quad (3)$$

$$t = \frac{1}{\beta E} \ln \frac{(1+v)(1-v_0)}{(1-v)(1+v_0)} \quad (4)$$

Первая формула (3) определяет нормализованную плотность захваченных электронов  $v$  на ловушках:  $v = n/n_{\infty}$  ( $n$  и  $n_{\infty}$  - количество электронов на ловушках в тестируемом образце и поглотившем максимально возможное количество радиации), а вторая формула (4) - расчет возраста  $t$  по отобранному образцу, где  $T$  и  $T_{\infty}$  - температура пика люминесценции тестируемого образца и поглотившего максимально возможное количество радиации;  $E$  - активность радиационного поля в точке пробоотбора;  $v$  и  $v_{\infty}$  - нормализованная плотность захваченных на ловушках электронов в тестируемом образце и в поглотившем максимально возможное количество радиации;  $k$  - константа Больцмана;  $\beta$  и  $\varepsilon$  - тоже константы, но устанавливаемые предварительным экспериментом,  $\beta$  - дозная чувствительность минерала-таймера,  $\varepsilon$  - энергия активации захваченных электронов.

В целом новый критерий, отражая стабильные термические свойства кварца, позволяет устранить негатив прежних методик ТЛ датирования и кардинально меняет ситуацию. Он делает подход к ТЛ датированию принципиально иным: стоимость и трудоемкость работ снижается на порядок, а сам метод становится надежным и доступным инструментом изучения четвертичных отложений.

К настоящему времени метод уже не раз был протестирован на классических четвертичных разрезах в котловине Мертвого моря, детально датированных по радионуклидам урановой серии [Stein et al., 1997]. На рис. 18 для примера показан итог серийного датирования отложений одной из высоких террас в котловине Мертвого моря.

Как видим, в 50-м толще этой террасы все полученные определения дали высокую плотность результатов с малым разбросом величин. Датировки отразили хорошо выраженную закономерность в формате принципа Стено «чем ниже, тем древнее», а в целом полученная последовательность возрастных определений практически не отличалась от рядов датировок, полученных [Stein et al., 1997] из аналогичных отложений по радионуклидам урановой серии.

## Обсуждение

Проблема датирования четвертичных отложений стоит очень остро. Она не проста, но решать ее необходимо. На инструментальном уровне сегодня можно решить практически любую задачу - технически современная электронно-элементная база позволяет осуществить это, причем с вполне приемлемыми затратами. Гораздо труднее решить вопрос о том, как сделать, чтобы специалисты, используя результаты датирования, были уверены в них, причем настолько, чтобы пойти, если этого потребуют новые результаты, на пересмотр прежних схем и взглядов. К сожалению, в этом плане имеют место тенденции, которые необходимо преодолевать. Можно выделить следующее.

Во-первых, играет роль приверженность ряда исследователей схемам и методам, используемым во время проведения среднемасштабной геологической съемки, осуществленной во второй половине прошлого века. Это было грандиозное мероприятие, когда практически с белого листа была покрыта вся территория бывшего СССР. Однако схемы и методы, приемлемые в середине прошлого века, далеко не всегда работают сегодня, что не раз обсуждалось в литературе [Астахов, 2006; Шейнкман, 2008]. В плане датирования мешает сохраняющаяся с тех пор привычка рассматривать его с позиций упрощенного восприятия, особенно относительно пробоотбора - поскольку тогда в основном преобладали радиоуглеродный и спорово-пыльцевой анализы, и для них было достаточно найти приемлемый материал и, не сопровождая отбор образцов особыми дополнительными процедурами, отправить их в лабораторию. Причем лабораторно-

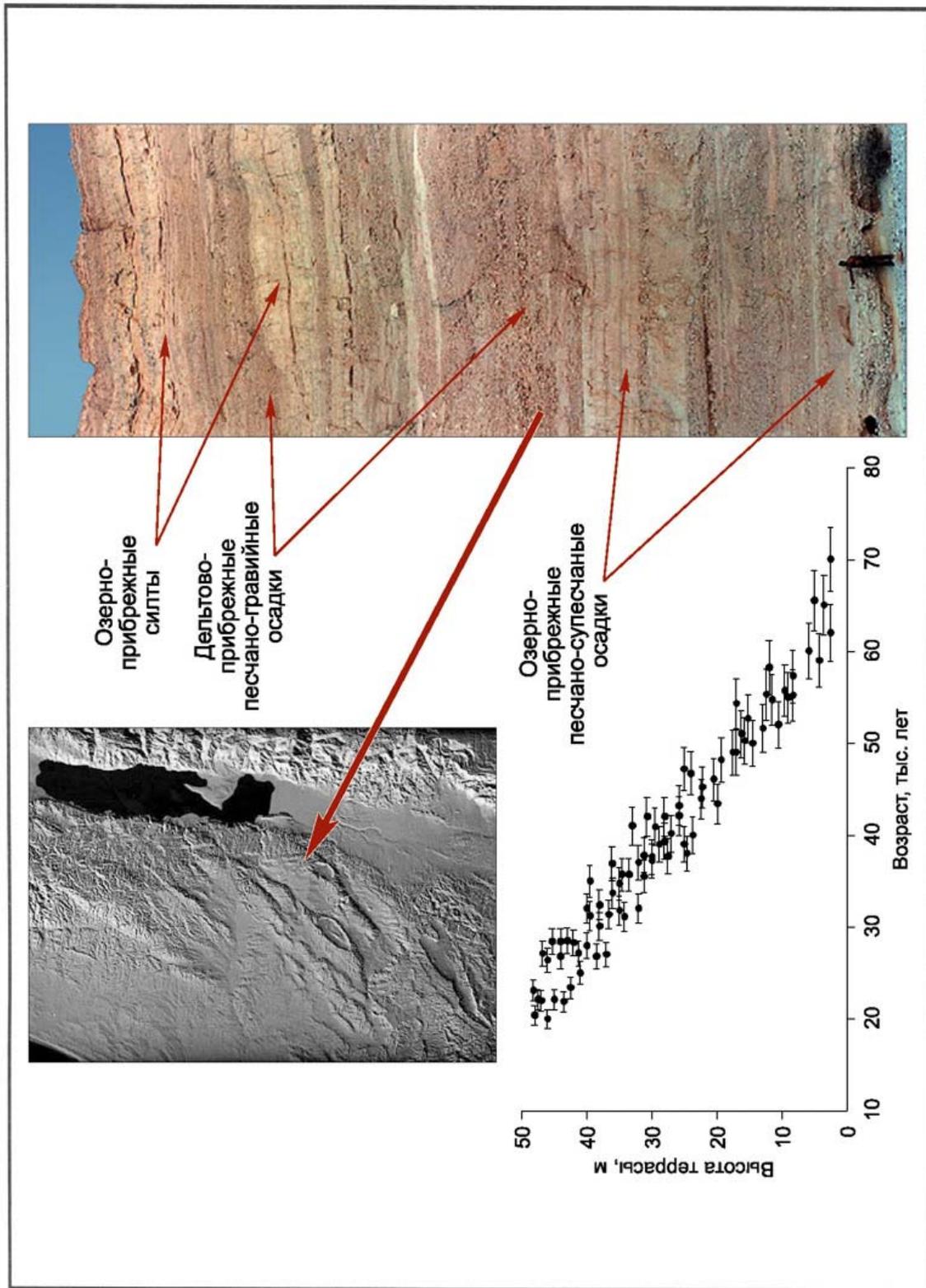


Рис. 18. Апробация новой технологии ТЛ датирования на классических четвертичных разрезах в котловине Мертвого моря – пояснения в тексте.

аналитическая база для такого рода исследований была достаточно разветвленной - тогда существовал межлабораторный контроль, и было возможно проводить статистическую отбраковку невалидных данных. Естественно, исследователи хотят получить возможность для подобных простых решений и сегодня, но в более широких рамках, обеспечиваемых новыми методами и подходами, тогда как последние требуют тщательного соблюдения довольно строгих правил отбора, хранения и обработки образцов, нарушение которых ведет к значительному искажению возрастной информации.

Во-вторых, сегодня в России нет единой программы развития методов датирования, и на фоне острого дефицита возрастных определений очень слабо осуществляется контакт между пользователями результатами датирования и специалистами в области геохронометрии. В результате появление новых возрастных определений в отношении четвертичных образований происходит или благодаря усилиям единичных подразделений, пытающихся, так или иначе, внедрить и использовать новые подходы и методы, или со стороны единичных исследователей на основе, опять же, их единичных контактов с зарубежными партнерами.

В-третьих, нужно осознавать, что организация датирования - вещь дорогостоящая, и в зарубежной практике сегодня получение данных возрастных определений нередко становится не только научным, но и производственным мероприятием, участники которого, поскольку оно в изрядной мере нацелено на самоокупаемость и получение прибыли, оказываются оторванными от объекта наблюдений. Это объективный процесс, и в такой ситуации вся ответственность за полученный результат ложится на заказчика возрастного определения, который должен полностью осознавать возможности используемого метода и вникать в особенности процедуры его реализации.

В-четвертых, сегодня в России нет ни центров межлабораторного контроля, ни подразделения, осуществляющего сертификацию той или иной методики, потому что лаборатории единичны и каждая из них действует самостоятельно. К сожалению, в такой ситуации исследователи, стремясь получить хоть какие-то количественные показатели на российских объектах, стараются наладить контакт с зарубежными партнерами-аналитиками, которые далеко не всегда вникают в суть событий, интерпретируемых на российской территории. Тем не менее, пользователи результатами датирования часто просто не задумываются о том, что реально можно извлечь из материала, который они отправляют в лабораторию. В итоге оценка появляющихся новых данных нередко происходит только с позиций того, что нравятся или не нравятся эти результаты определенному исследователю, точнее - работают или не работают они на его концепцию.

Вопрос о неправомерности подобного подхода не раз поднимался автором настоящей статьи [*Шейнкман 2008, Шейнкман и др., 2009, 2011*]. Кроме того, к нему, как к одному из немногих в России исследователей, занимающихся внедрением новых методов датирования четвертичных образований, продолжают обращаться с вопросами, как относиться к тем или иным результатам и как вообще выходить из положения с датированием. Что можно ответить на такие вопросы? - Позиция автора в этом плане позиция однозначная. В ней два аспекта.

Первый аспект касается перспектив датирования четвертичных отложений. Реальность такова, что, несмотря на позитив существенного расширения в России сети лабораторий  $^{14}\text{C}$  датирования, с внедрением других методик сохраняется много сложностей. Единственной, и, по-видимому, на долгое время, установкой УМС-AMS, также для датирования по  $^{14}\text{C}$ , будет установка, создаваемая в Новосибирском Академгородке. Насколько доступным и приемлемым по цене будет датирование на ней, покажет время. В любом случае это будет датирование только по органике и в обусловленных возможностями  $^{14}\text{C}$  метода ограничениях.

Что касается создания установок УМС-AMS, ориентированных на широко используемое ныне за рубежом датирование по  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$  в скальных породах, для него необходима разрешающая способность аппаратуры существенно выше, чем по  $^{14}\text{C}$ , и нужно признать, что на ближайшее будущее в России создания таких установок даже не

намечается. Поэтому реальный выход из положения - разработка приемлемых для условий России методик дозиметрического датирования, в первую очередь - люминесцентного анализа по содержащим кварц отложениям. Поскольку главное достоинство этого минерала заключается в его вездесущности, устойчивости в отношении химического и механического воздействия и хорошей изученности. Тем более что современная приборно-элементная база позволяет сделать аппаратуру для работы с кварцем не только высокопроизводительной и позволяющей использовать статистический контроль результатов, но и компактной, относительно недорогой и, поэтому, доступной различным исследовательским подразделениям.

Второй аспект касается оценки того или иного массива данных, так или иначе накапливаемых в процессе использования в России новых методов датирования. Вопрос этот деликатный, поэтому будем оперировать только объективной конкретикой опытно-экспериментального характера.

Помимо единичных  $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ , ЭПР-ЭСР и некоторых других возрастных определений, которые можно считать достаточно надежными - большей частью они получены в сотрудничестве с зарубежными партнерами, в основном на российском научно-информационном поле фигурируют различные материалы на основе люминесцентного анализа. Первый небольшой массив этих данных был введен в научный оборот в 1970-х гг., когда на территории бывшего СССР появились две упомянутые выше установки ТЛ анализа - в Москве и Киеве. Они стали поставлять по России свои, тогда еще единичные, данные возрастных определений, полученные на базе традиционной технологии - использующей для расчета первый порядок кинетики ТЛ процесса.

Данные эти были часто противоречивы, но других не было, и они поставлялись до конца 1980-х гг. В условиях острого дефицита датировок в их использовании естественно проявился субъективный фактор. Наиболее ярко это проявилось при датировании четвертичных образований в Сибири, где вопрос о дефиците возрастных определений стоял особо остро. Типичный пример - временная привязка в четвертичных толщах разрезов Алтая, когда по единичным ТЛ определениям по основным моренам (которые, как было показано выше, этим методом датировать вообще неправомерно) были выделены ледниковые эпохи плейстоцена, что даже было помещено в издание [*Стратиграфический словарь....., 1982*]. Дело в том, что эти датировки были изрядно «состарены» прежней процедурой ТЛ анализа, но хорошо ложились на кальку господствовавших тогда европейских схем - этот вопрос детально разбирался в работах [*Шейнкман, 2002а, 2002б*], поэтому здесь на нем детально останавливаться не будем. Отметим только, что результаты повторного датирования алтайских разрезов, проведенного автором по технологии ТЛ анализа нового поколения, дало возрастные определения в разы моложе - все морены, ранее считавшиеся среднеплейстоценовыми образованиями, оказались по нашим данным позднеплейстоценовыми.

К концу 1980-х гг. новое, на основе регионально-эталонной технологии, направление в методике ТЛ анализа (см. выше) окрепло, и посредством ее был проведен ввод большого массива новых данных сначала по Русской равнине, а затем и по Сибири. Все это было доложено в 1990 г. на 7 Всесоюзном совещании по изучению четвертичного периода по [*Шлюков и др., 1990; Шейнкман, 1990*], и тогда же был поставлен вопрос о пересмотре результатов, полученных посредством прежней процедуры ТЛ датирования.

Таким образом, ответ на вопрос, как относиться к материалам датирования 1970-х гг. в России и данным, полученным по прежней технологии ТЛ датирования, был дан уже в то время. Не все исследователи соглашались с таким вердиктом, тем более что корректировка вызвавших споры ТЛ датировок нового поколения проводилась посредством относительно мало известного варвоциклитного анализа, а вскоре наступил резкий спад в исследованиях, нацеленных на развитие аналитической базы датирования, и новых материалов по данной тематике длительный период не публиковалось. Больше того, отдельные исследователи не стали вникать в суть противоречий разных методик ТЛ анализа и начали выступать против люминесцентного датирования вообще (см. обзоры

[Шейнкман, 2008; Шейнкман и др., 2009, 2011]) - эта точка зрения, конечно, была крайней, но, тем не менее, показывала состояние датирования и остроту проблемы.

В тех условиях исследования автора и его коллеги А.И. Шлюкова пришлось перенести из России в Израиль, где в конце 1990-х гг. на их проведение автором были получены соответствующие гранты. Прежде всего, в процессе этих исследований было решено дать принципиальный ответ на вопрос о корректности используемой тогда регионально-эталонной разновидности ТЛ анализа. Это было сделано посредством тестирования метода повторным датированием позднеплейстоценовых отложений в классических, надежно и детально датированных М. Штайном с коллегами [Stein et al., 1997] разрезах Мертвого моря (рис. 19).

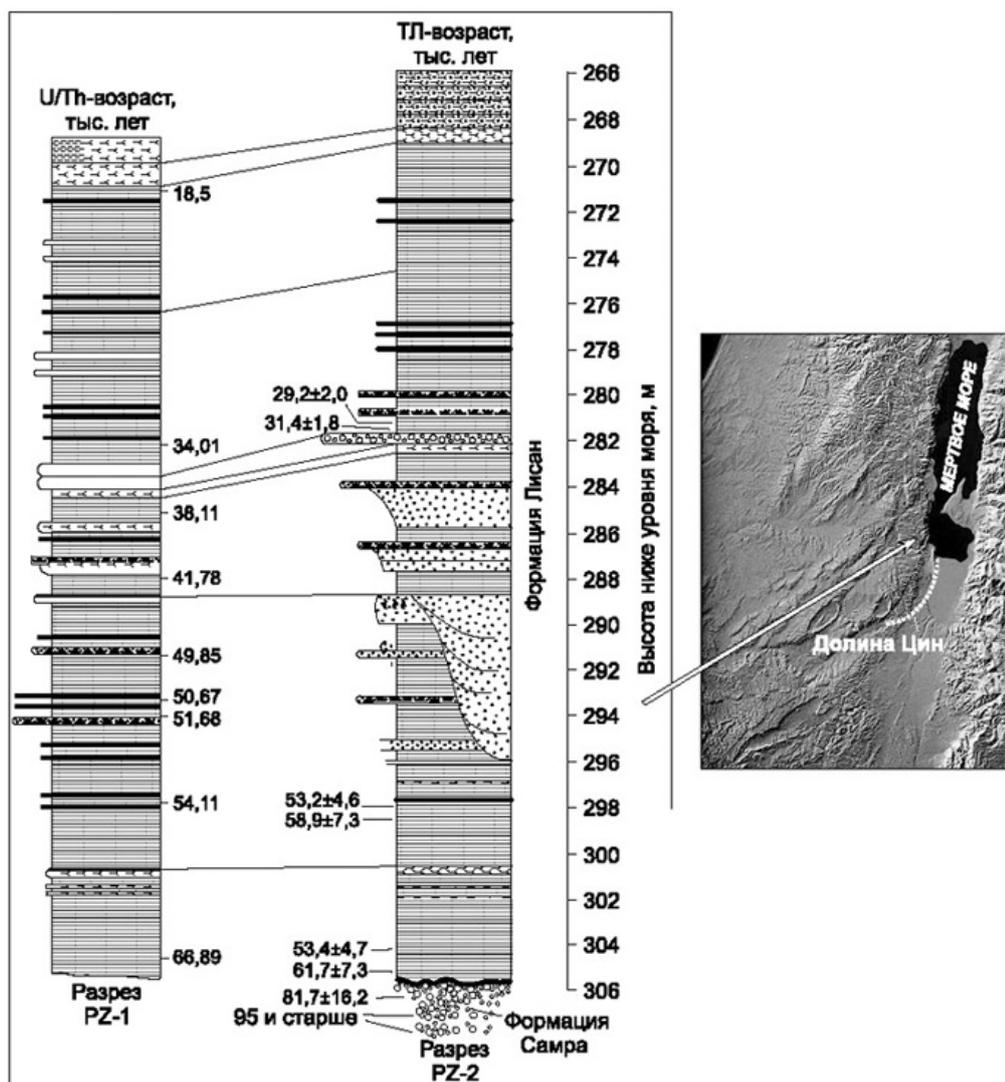


Рис. 19. Тестирование данных датирования регионально-эталонной технологии ТЛ анализа на классических разрезах Мертвого моря посредством их сравнения с результатами U/Th возрастных определений по [Stein, M. et al., 1997]

Как видим, наши результаты, и результаты научной группы М. Штайна, практически совпали. После этого было выполнено еще несколько серий датировок этим методом в окрестностях Мертвого Моря [Sheinkman, Shlukov, 2001; Sheinkman, 2002], которые подтвердили валидность нового подхода и его результативность.

Это также относится к вопросу о том, насколько постороннему читателю можно быть уверенным соответствующих результатах датирования. Если первый в России массив данных ТЛ анализа, полученных по прежней технологии, существовал как бы сам по себе, то массив возрастных определений, полученных посредством регионально-

эталонной технологии ТЛ анализа и введенных в научный оборот автором и его коллегой А.И. Шлюковым, был неоднократно проверен путем перекрестного датирования известными надежными методами. Эта же технология стала применяться с конца 1990-х гг., правда, пока очень ограниченно, в Бурятском НЦ СО РАН; ее применяет еще один коллега автора - А.В. Перевалов [*Перевалов и др., 1997, 2009*], с подразделением которого также поддерживается тесное сотрудничество.

На разрезах Мертвого моря была отработана технология ТЛ анализа и на следующем этапе его развития - пиково-температурный метод. Эта работа началась уже в середине 2000-х гг., когда стало ясно, что преодолеть ограничения регионально-эталонного подхода невозможно. Полученные тогда, посредством нового метода, результаты также практически совпали с возрастными определениями М. Штайна (один из датированных разрезов показан на рис. 17). Они были доложены на XVII конгрессе INQUA [*Shlukov, Sheinkman, 2007*], получили одобрение, и вскоре после этого, когда ушел из жизни постоянный партнер автора А.И. Шлюков, исследования переместились в Сибирь, в ИКЗ СО РАН. Здесь к работе подключилась группа молодых инженеров-физиков, которые благодаря возможностям современной элементной базы приборостроения поставили задачу сделать аппаратуру для ТЛ датирования по новой технологии компактной, переносной и настолько надежной, чтобы ее можно было использовать непосредственно в полевых условиях. В настоящее время эта работа завершается.

Оценивая новые данные по датированию четвертичных объектов в России нельзя не затронуть большие массивы данных, которые в последние годы введены в научный оборот зарубежными исследователями. Самый большой из них, касающийся горячо обсуждаемой проблемы древних оледенений на северо-западе Евразии, получен при осуществлении проекта QUEEN [*Svendsen et al., 2004*]. Поскольку в нем представлено большое количество люминесцентных датировок, к автору часто обращаются с традиционным вопросом, как к ним относится, потому что нередко исследователи, представляющие свои схемы и использующие эти датировки, осторожно уточняют - если эти датировки верны. Иными словами, прослеживается все та же тенденция: вместо вникания в суть технологий датирования хотя бы на уровне, чтобы уметь характеризовать степень достоверности возрастных определений, ряд исследователей просто ожидает, что это сделает кто-то еще. В условиях России это тупиковый подход.

Тем не менее, о данных проекта QUEEN можно сказать, что в процессе его осуществления была проделана огромная работа с большим объемом разного рода аналитики. Те возрастные определения, что получены на основе отработанных радиометрических технологий, не нуждаются в комментариях. Что касается многочисленных люминесцентных датировок, то у автора нет доступа к протоколам отбора и обработки образцов, и он может сказать только следующее. Если исследователи использовали процедуру датирования, исключая искажение результатов, и с корректировкой данных перекрестным датированием известными надежными методами, то таким данным можно доверять - эти вопросы были детально освещены в соответствующих разделах настоящей статьи и не будем к ним возвращаться.

Можно для примера отметить, что в проекте QUEEN участвовала упомянутая выше лаборатория А.Н. Молодкова, который очень тщательно относится к датированию, и его ОСЛ определения выполняются с кропотливым выделением мономинеральной фракции минерала-хронометра и последующей заверкой полученных данных результатами ЭПР-ЭСР датирования. Такие возрастные определения не нуждаются в комментариях. Однако среди фигурирующих в проекте QUEEN временных привязок фигурируют и те, что основаны на люминесцентных определениях, выполненных по образцам, порой явно отобраным из быстро захороненных осадков, не успевших пройти отбеливание. Или из осадков с меняющимся, в процессе их нахождения в изучаемой толще пород, облучением. Кроме того, ряд определений выполнен по методике усредненной оценки выцветания ТЛ

сигнала. На наш взгляд, оперировать такими определениями нужно крайне осторожно, и в каждом конкретном случае вникать в суть процедуры получения датировок.

Надо отметить, что внедрение новых методов возрастной диагностики и появление полученных с их помощью данных в любом случае повлечет за собой требование пересмотра прежних схем. Тенденция такого рода - процесс объективный, и с ним необходимо считаться.

Даже если оставить в стороне дискуссию о правомерности датирования определенными разновидностями люминесцентного датирования, когда были существенно омоложены [Шейнкман, 2002а; 2002б] возрастные определения, представленные в [Разрез..., 1978; Стратиграфический..., 1982], ставят на повестку дня вопросы такого рода новые и уже не дискутируемые возрастные определения. Можно привести два примера, связанных с датированием по  $^{10}\text{Be}$  каменного материала конечных морен.

Первый пример - датирование конечных морен вблизи современных ледников Полярного Урала, проведенное посредством  $^{10}\text{Be}$  метода научной группой Яна Мангеруда [Mangerud et al., 2008]. Морены вблизи современных ледников оказались отложенными в период МИС-2, а в двух десятках километров от них - в МИС-3 - МИС-4 (рис. 20), что практически ставит точку в многолетних спорах о размерах позднеплейстоценового оледенения в Приуралье, подтверждая вывод о его ограниченности.

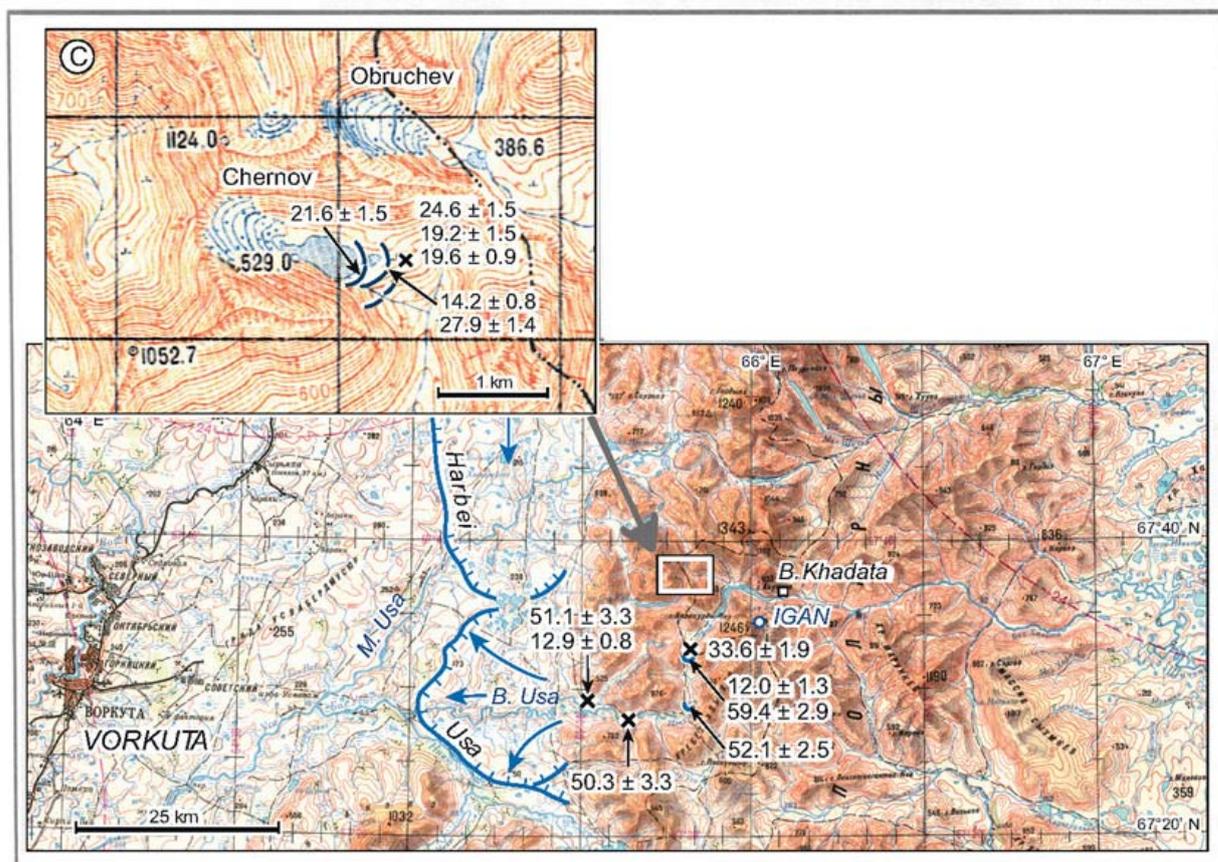


Рис. 20. Копия схемы из [Mangerud et al., 2008] с положением датированных по  $^{10}\text{Be}$  конечных морен вблизи современных ледников Полярного Урала.

Второй пример из Северной Монголии. Здесь в Прихубсугулье устья трогов, открывающихся в межгорные котловины, окаймляются амфитеатрами конечных морен. Эти морены во время проведения среднемасштабной геологической съемки были отнесены к среднему плейстоцену. В начале 2000-х гг. автором в этом районе проводились исследования и по аналогии с датированными им ранее моренами Алтая [Шейнкман, 2002а; 2002б] отмеченные морены также были отнесены к отложениям

начала позднего плейстоцена, соответствующих по возрасту МИС-5е [Шейнкман и др., 2006, 2009]. Но Аланом Гиллеспи (университет Вашингтона) во время совместных с ним исследований автора в Дархадской котловине, расположенной к востоку от оз. Хубсугул, по отобраным тогда образцам на  $^{10}\text{Be}$  (рис. 21) было получено около двух десятков существенно более молодых возрастных определений, соответствующих по возрасту МИС-2. Эти результаты пока не опубликованы Аланом Гиллеспи в отдельной статье, но уже представлены и озвучены им в его докладе на недавнем XVIII конгрессе INQUA [Берн, 2011].

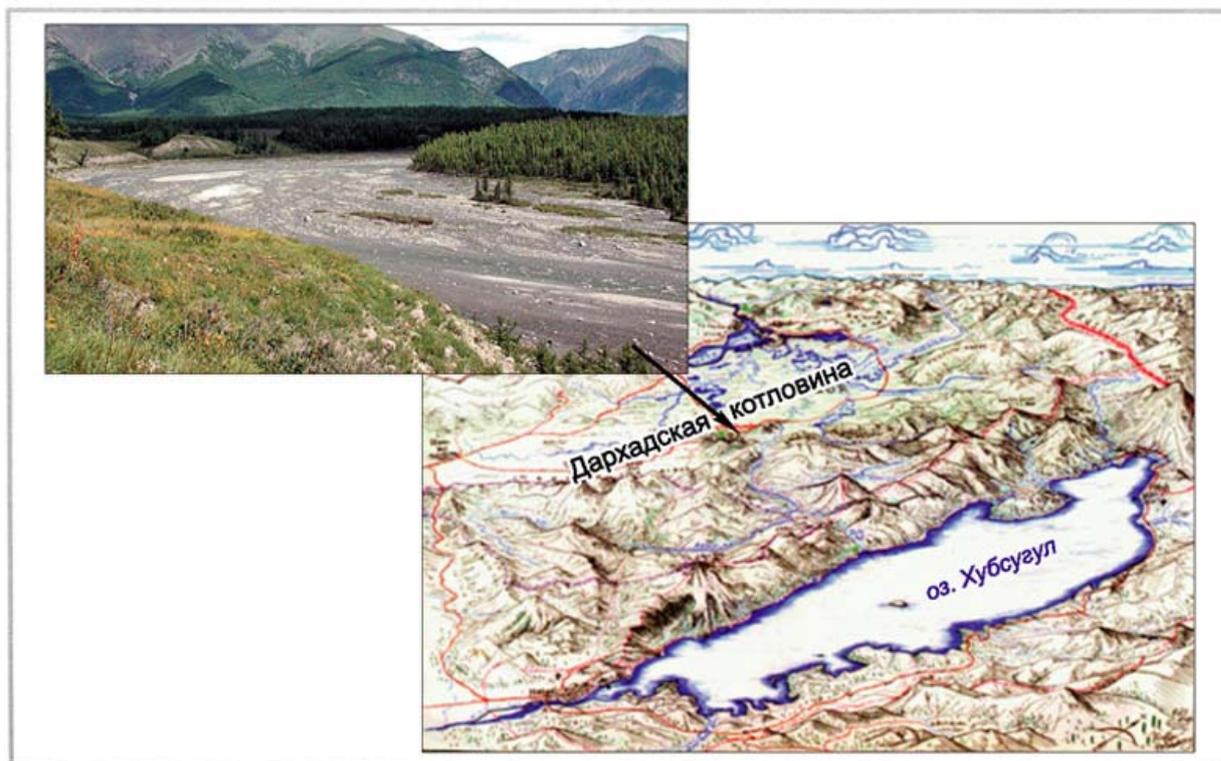


Рис. 21. Прихубсугулье и один из конечно-моренных комплексов, датированных по  $^{10}\text{Be}$

Скорее всего, в Дархадской котловине более молодые морены лежат на более древних. Но в любом случае, как и в ситуации по Полярному Уралу, новые данные возрастной диагностики требуют существенного переосмысления взглядов на ход четвертичного оледенения и пересмотра прежних палеогеографических схем.

Повторим еще раз: обновление методик датирования и схем, обоснованных возрастными определениями, - процесс объективный. Безусловно, некоторые исследователи будут определенное время с недоверием относиться к новым методам возрастной диагностики и построениям на базе полученных с их помощью результатов. Поэтому повторим и то, что степень доверия к этим результатам будет зависеть только от того, насколько исследователи осознают физическую суть новых методов и требования процедуры их применения.

### Заключение

Подытоживая изложенное, следует сказать, что хронологическая структуризация четвертичных событий - важнейший компонент обобщения накопленного опыта в науках о Земле, поскольку на костяке временной шкалы строится геосистемное упорядочивание данных. Не все методы датирования пока точны. Тем не менее, целый ряд из них уже хорошо отработан и в свою очередь они служат надежной базой для тестирования новых методов.

Сила геохронометрии как раз и заключается в том, что методы различны, и их перекрестные данные могут контролировать друг друга. Продолжить эту мысль можно еще одной эмоциональной цитатой упомянутого в начале статьи исследователя: «Если бы это было не так, так и говорить было бы не о чем! Это как с корабельными хронометрами: если он один, никак нельзя определить, когда он врет; если два - уже можно понять, что один из них врет, неясно, лишь, какой из двух; ну а если их три или больше - точное время можно узнать практически всегда».

Проблем в геохронометрии, конечно, сегодня стоит немало. Автор много лет посвятил изучению методик датирования и разработке новых подходов к нему. Он понимает, что в руках специалистов пока только механизмы возрастной диагностики на геологических курантах с часовой стрелкой, и еще нет часов с минутной и, тем более, секундной стрелками. Но, опираясь на имеющиеся результаты исследований, уже можно говорить о реальности уверенно определять возраст основных образований квартера в достаточно широких пределах. Тем более что сегодня можно уже говорить и о том, что есть альтернатива традиционным, ограниченно работающим методам.

На наш взгляд наибольшая перспектива у дозиметрических методов, в первую очередь у ТЛ метода по кварцу - строгость структуры и свойств этого минерала позволяют выделять в его развитии физические явления, надежно интерпретируемые как временная компонента. Предложенная в статье новая ТЛ методика работы с этим минералом-таймером, созданная на основе разработок автора и А.И. Шлюкова, позволяет реально выйти на высокопроизводительные технологии возрастной диагностики практически любых четвертичных отложений в диапазоне первых сотен тысяч лет. Она вполне доступна для исследователей самого разного профиля, и по сравнению с прежними методиками ТЛ анализа не только на порядок выше по производительности, но и значительно надежнее, точнее и гораздо дешевле. Это, безусловно, не панацея, но новый подход дает возможность существенно продвинуться в решении острой и насущной проблемы датирования четвертичных образований. Главное - он позволяет проводить доступным способом серийный отбор образцов и на его основе осуществлять статистический контроль датировок, что на сегодня является важнейшим критерием их проверки.

Автору хотелось бы и в заключении подчеркнуть тот факт, что первыми в геологии еще в 1960-е гг. обосновали применение ТЛ-метода датирования Г.В. Морозов на Украине и А.И. Шлюков в России. Отечественная наука в этой области заложила солидную базу и занимала ведущие позиции. Однако затем часть из них была утеряна, и сегодня обозначились настораживающие тенденции в том плане, что некоторые исследователи, ссылаясь на спорные датировки и не вникая в методик, предлагают «отменить» ТЛ-датирование, тогда как на деле они просто некорректно используют не только данные датирования, но и подходы к нему [Шейнкман и др., 2009, 2011]. Поэтому подчеркнем еще раз и то, что если исследователи, изучая образования квартера, хотят оперировать валидными возрастными определениями, то нет иного способа получить их, как посредством вникания в отмеченную выше «заумь» методик, а затем - тщательного соблюдения их.

Отметим также, что в России ныне началось создание установок ТЛ датирования нового поколения. Но порой исследователи идут по пути далеко не всегда продуманного дублирования зарубежных методик, что на наш взгляд и дорого, и непродуктивно. Теоретические и практические отечественные разработки в рассмотренной области, заложенные намного раньше зарубежных [Морозов, 1968; Шелкопляс, 1974; Шлюков и др., 1990; Morosov, 1968], были хорошо обоснованы с позиций физики [Фок, 1964; Антонов-Романовский, 1966; Физическая..., 1990]. Сегодня именно на их базе создана новая технология датирования, результаты которой уже достаточно аргументированы и подкреплены результатами корректных многочисленных экспериментов [Шейнкман и др., 2009, 2011]. И именно они сегодня позволяют решать поставленные задачи на наиболее высоком научном уровне.

Таким образом, намного целесообразней объединить усилия исследователей для снятия накопившихся проблем и создания не зависящей от капризов зарубежного производителя доступной аппаратной базы на основе отечественных разработок. Тем более что на основе временной привязки четвертичных комплексов экстраполируется тренд и строится прогноз развития окружающей среды, а от степени детализации и надежности выявления событий плейстоцена зависит верность проводимых построений.

### Благодарности

Понимая, насколько трудно в современной ситуации развивать методику датирования четвертичных отложений, автор осознает, что без поддержки коллег продвигаться вперед было бы просто невозможно. Поэтому он приносит свою искреннюю благодарность за огромную помощь в осуществлении задач возрастной диагностики руководителям ИКЗ СО РАН и ИГ СО РАН академику В.П. Мельникову и проф. В.М. Плюснину. Также автор приносит искреннюю благодарность нынешнему главе Комиссии по изучению четвертичного периода РАН проф. Ю.А. Лаврушину, который постоянно оказывал автору всемерную дружескую и научную поддержку. Автор хотел бы выразить свою признательность и создателю первой в России лаборатории ТЛ анализа, с которым он проработал бок о бок не одно десятилетие - А.И. Шлюкову, хотя он и ушел недавно из жизни. Но сегодня работает научное наследие этого исследователя, без которого многие задачи возрастной диагностики сегодня просто не могли бы быть поставлены.

### Литература

- Антонов-Романовский В.В.* Кинетика фотолюминесценции кристаллофосфоров. М., Наука, 1966, 324 с.
- Афанасьев С.Л.* Геохронологическая шкала фанерозоя и проблема геологического времени. М., Наука, 1987, 144 с.
- Афанасьев С.Л., Архипов С.А.* Наноциклитный метод определения геологического Возраста четвертичных отложений. Новосибирск, Наука, 1990, 126 с.
- Богатилов О.А., Гурбанов А.Г., Кошуг Д.Г., Газеев В.М., Шабалин Р.В.* ЭПР датирование по пороодообразующему кварцу извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия) // Доклады РАН, 2002, т. 385, №1, с. 92-96.
- Вагнер Г.А.* Научные методы датирования в геологии, археологии и истории (Перевод с английского). М., Техносфера, 2006, 576 с.
- Власов В.К., Куликов О.А.* Расчет скорости накопления дозы при термолюминесцентном датировании // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233. №3. С. 467-469.
- Власов В.К., Куликов О.А.* К вопросу о пределах применимости РТЛ-метода. Методы изотопной геологии. Тезисы докладов Всесоюзной школы-семинара, ч. 2. 1987. М., с. 258-259.
- Вяткин С.В.* Термоселективная методика датирования кварца по А1-парамагнитным центрам и уточнение хронологии извержений вулкана Эльбрус. Диссертация на соискание ученой степени к. г.-м. н., М., МГУ, 2007, 137 с.
- Завойский Е.К.* Электронный парамагнитный резонанс и физика плазмы. Избранные труды: М., Нука, 1990, 343 с.
- Матросов И.И., Чистяков В.К., Погорелов Ю.Л.* Исследование термолюминесценции геологических материалов. Томск, 1979, изд-во Томского университета, 114 с.
- Матросов И.И., Погорелов Ю.Л.* О сверхлинейности накопления светосуммы ТЛ в кварце // Журнал прикладной спектроскопии, 1978. Т. 29, Вып.5, с. 23-29.
- Морозов Г.В.* Применение термолюминесцентного метода для изучения отложений лессовой формации. Автореферат на соискание ученой степени к. г.-м. н. Киев, Институт геологических исследований АН УССР, 1968, 23 с.
- Перевалов А.В., Резанов И.Н.* Первый опыт термолюминесцентного датирования антропогенных отложений юго-западного Забайкалья // Геология и геофизика, 1997, т. 38, № 7, с. 1245-1251.
- Перевалов А.В., Шейнкман В.С., Лютнев В.П., Цыденов А.Б.* Дозиметрические свойства природного кварца и возможности его использования для определения возраста четвертичных

- отложений // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы III международной конференции. Томск, 2009, с. 440-443.
- Разрез новейших отложений Алтая (Под ред. К.К. Маркова). 1978. М., изд-во МГУ, 208 с.
- Руководство по изучению новейших отложений. (Под ред. П.А. Каплина). М., изд-во Московского университета, 1987, 238 с.
- Стратиграфический словарь СССР. Палеоген, неоген, четвертичная система. Л., Недра, 1982, 616 с.
- Физическая энциклопедия. Т. 2. (Под ред. А.М. Прохорова). М., Советская энциклопедия, 1990, 703 с.
- Фок М.В. Введение в кинетику люминесценции кристаллофосфоров. М., Наука, 1964, 283 с.
- Шабалин Р.В. ЭПР датирование по пороодообразующему кварцу извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ) // Доклады РАН, 2002, т. 385, № 1, с. 92-96.
- Шейнкман В.С. Четвертичное оледенение в горах Сибири как результат взаимодействия гляциальных и мерзлотных процессов // Материалы гляциологических исследований, 2008, № 105 с. 51-72.
- Шейнкман В.С. Тестирование S-S-технологии термолюминесцентного датирования на разрезах побережья Мертвого моря, её использование в Горном Алтае и палеогеографическая интерпретация результатов // Археология, этнография и антропология Евразии, № 2, 2002а, с. 22-37.
- Шейнкман В.С. Возрастная диагностика ледниковых отложений Горного Алтая, тестирование результатов датирования на разрезах Мертвого моря и палеогляциологическая интерпретация полученных данных // Материалы гляциологических исследований. Вып. 93. М., 2002б, с. 17-25.
- Шейнкман В.С. К проблеме датирования четвертичных отложений в горах Сибири // Палеогеография Средней Сибири. 1995, Вып.2, Красноярск, с.191-199.
- Шейнкман В.С. Об изучении следов четвертичных оледенений в горах Юга Сибири // Четвертичный период: методы исследования, стратиграфия и экология. Материалы 7 Всесоюзного совещания. Т. 3. Таллинн, 1990, с. 173 -174.
- Шейнкман В.С., Мельников В.П. Актуальность, возможности и проблемы датирования четвертичных отложений // Квартер во всем многообразии. Материалы VII Всероссийского Совещания по изучению четвертичного периода. Апатиты - Санкт-Петербург, 2011, с. 309-312.
- Шейнкман В.С., Антипов А.Н., Шлюков А.И. Абсолютное датирование четвертичных комплексов: проблемы и возможные решения // Фундаментальные проблемы квартера: Итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Материалы VI Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Новосибирск, СО РАН, 2009, с. 625-628.
- Шейнкман В.С., Кривоногов С.К. Парадокс агградации многолетнемерзлых пород в Сибири и Монголии и его связь с динамикой четвертичного оледенения // Материалы международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений», Тюмень, 2006, Т. 2, Научный Совет по криологии Земли РАН, с. 65-70.
- Шелкопляс В.Н. Термолюминесцентный метод и его применение для стратиграфии плейстоценовых субаэральных отложений. Автореферат на соискание ученой степени д. г.-м.н. Киев, Институт геологических исследований АН УССР, 1974, 45 с.
- Шлюков А.И. Способ определения абсолютного времени образования геологических и археологических объектов. Патент: RU 225 3103 C1, Бюллетень № 15,2005, 18 с.
- Шлюков А.И., Воскоеская Л.Т., Ляшенко М.Г., Шаховец С.А., Шейнкман В.С. Прогресс новой ТЛ-технологии на Русской равнине. Четвертичный период: методы исследования, стратиграфия и экология. Материалы 7 Всесоюзного совещания, Т. 3, Таллинн, 1990. с. 185-186.
- Aitken M.J. [An introduction to optical dating](#). Oxford University Press, 1998, 267 p.
- Aitken M.J. Thermoluminescence dating. London, Orlando, San Diego, New York, Austin, Montreal, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press. 1985, 359 p.
- Aitken M.J., Tite M.S., Reid J. [Thermoluminescent dating of ancient ceramics](#) // Nature, 1964, Vol. 202, pp. 1032-1033.
- Chen Y, Feng J., Gao J., Grun R. [Investigation of the potential use of ESR signals in quartz for palaeothermometry](#) // Quaternary Science Reviews, 1997, vol. 16, p. 495-499.
- Daniels F., Boyd C.A., Saunders D.F. [Thermoluminescence as a research tool](#) // Science, 1953, № 117, pp. 343-349.
- Dating Quaternary Sediments (Ed.: Easterbrook, D. J.). Geological Society of America Special Paper, 1988, № 227,165 p.

- Dating and earthquakes: review of Quaternary geochronology and its application to paleoseismology (Eds.: Sowers J.M., Noller J.S., Lettis W.R.). NUREG/CR-5562. 1998, 752 p.
- English P., Spooner N.A., Chappell J., Questiaux D.G., Hill N.G.* [Lake Lewis basin, central Australia: environmental evolution and OSL chronology](#) // Quaternary International, 2001, № 83-85, pp. 81-101.
- Frechen M., Dodonov A.E.* [Loess chronology of the Middle and Upper Pleistocene in Tadzhikistan](#) // Geol Rundsch., 1998, № 87, pp. 2-20.
- Grun R.* [Electron spin resonance \(ESR\) dating](#) // Quaternary International, 1989, vol. 1, pp. 65-109.
- Huntley D.J., Godfrey-Smith D.I., Thewalt M.L.W.* [Optical Dating of Sediments](#). Nature, 1985, vol. 313, pp. 105-107
- Ikeya M.* [New applications of electron spin resonance. Dating, Dosimetry and Microscopy](#) // World Scientific. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, Bangalore, 1993, 500 p.
- Ikeya M.* [ESR \(EPR\) dating based on natural radiation effects](#) // Nuclear Geophysics, 1994, vol. 8, № 3, pp. 201-224.
- Kennedy G.C., Knoph L.* Dating by thermoluminescence // Archeology, 1960, №13, pp. 147-148.
- Libby W.F.* Radiocarbon Dating. University of Chicago Press. 1955, 174 p.
- Liritzis I.* [Advances in thermo- and opto-luminescence dating of environmental materials \(Sedimentary Deposits\)](#). Global nest: The International Journal, 2000, vol. 2, N0 1, pp. 3-49.
- Luminescence and ESR dating and allied research* (Ed.: Wintle, A. G.). Radiation Measurements, Special Issue, 1997, №27 (5/6), 1025 p.
- Mangerud J., Gosse J., Matiouchkov A., Dolvic T.* [Glaciers in the Polar Urals, Russia, were not much larger during the Last Global Maximum than today](#) // Quaternary Science Review, № 27, 2008, pp. 1047-1057.
- Molodkov A.N.* [ESR dating evidence for early man at a Lower Palaeolithic cave-site in the Northern Caucasus as derived from terrestrial mollusc shells](#) // Quaternary Science Reviews. 2001, vol. 20, pp. 1051-1055.
- Molodkov A.N.* ESR Dating of Lymnaea baltica and Ceras-toderma glacium from Low Anclylus Level and Transgressive Litorina Sea Deposits // Applied Radiations and Isotopes, 1996, vol. 47, № 11/12, pp. 1427-1432.
- Morosov G.V.* The relative dating of Quaternary Ukrainian sediments by the thermoluminescence method. 8th Quaternary Association Congress, Paris, 1968. pp. 167.
- Porat N., Amit R., Zilberman E., Enzel Y.* [Luminescence dating of fault-relayed alluvial fan sediments in the Southern Arava valley, Israel](#) // Quaternary Science Reviews, 1997, vol. 16, pp. 397-402.
- Randall J.T., Wilkins M.H.F.* [Phosphorescence and electron traps](#) // Proc. Royal Soc., Ser. A 184, 1945, pp. 366-407.
- Rink W.J.* [Electron Spin Resonance \(ESR\) Dating And ESR Applications In Quaternary Science And Archaeometry](#) // Radiation Measurements 1997. V. 27. - №. 5-6.-p. 975-1025.
- Sheinkman V.S.* Quaternary Glaciations - Extent and chronology. Chapter: [Glaciation in the High Mountains of Siberia](#). INQUA. Amsterdam, Elsevier, 2011, pp. 883-907.
- Sheinkman V.S.* [Late Pleistocene invasion of Palaeo-Dead Sea into the lower Zin Valley, the Negev Highlands, Israel](#) // European Geosciences Union Stephan Mueller Special Publication Series. Vol. 2. - 2002. -P. 113-122.
- Sheinkman V.S., Melnikov V.P., Panyukov D.A.* A new approach to TL dating and its realization in Siberia // Proceedings of the XVIII INQUA Congress. Bern, 2011, ID 622.
- Sheinkman V.S., Shlukov A.I.* Experimental age determination of the Lisan sediments by speeded-up technique of TL dating (S-S method). Israel Geol. Soc. Annual meeting, 2001, pp.110.
- Shlukov A.I., Sheinkman V.S.* Dating the highest Sediments of the Dead Sea Late Pleistocene. Precursor by new TL-technique // Quaternary International. 2007, Vol. 167-168. XVII INQUA Congress: ELSEVIER, pp. 382.
- Shlukov A.I., Sheinkman V.S.* Saturation of 300°C peak of quartz: a working hypothesis // LED 2002 - 10th International conference on luminescence and electron spin resonance dating. Reno, Nevada, 2002, pp. 161.
- Shlukov A.I., Shakhovets S.A., Voskovskaya L.T., Lyashenko M.G.* [A criticism of standard TL dating technology](#) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1993, №73, pp. 373-381.
- Stein M., Starinsky A., Katz A., Goldstein S.L., Machlus M., Schramm A.* [Strontium isotopic, chemical, and sedimentological evidence for the evolution of Lake Lisan and the Dead Sea](#) // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997, № 61 (18), pp. 3975-3992.

*Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I., Demidov I., Dowdeswelle J.A., Funder S., Gataullin V., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Hubberten H.W., Ingolfsson O., Jakobsson M., Kjaer K.H., Larsen E., Lokrantz H., Lunkka J.P., Mangerud A.J., Matiouchkov A., Murray A., Moller O., Niessen F., Nikolskaya O., Polyak L., Saarnisto M., Siegert C., Siegert M.J., Spielhagen R.F., Stein R.* [Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia](#) // Quaternary Science Reviews, 2004, № 23, 1c. 229-1271.

*Wagner G.A.* Age determination of young rocks and artifacts. Berlin, Heidelberg, New York etc. Springer, 466 p.

*Walker M.* [Quaternary Dating Methods](#). John Wiley and Sons, 2005, 286 p.

*Zeller E.J., Levy P.W., Mattern P.L.* Geologic dating by electron spin resonance // Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting. Proceedings of symposium. International Atomic Energy Agency in Cooperation with joint Commission on Applied Radioactivity (ICSU). Monaco, March 2-10.1967, Vienna, p. 531-540.

*Zeller E.J.* Use of electron spin resonance for measurement of natural radiation damage // Thermoluminescence of Geological Materials. London: Acad. Press., 1968, pp. 271-279.

**Ссылка на статью:**



**Шейнкман В.С. Абсолютное датирование четвертичных отложений - современное состояние и перспективы** // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2011. № 71. С. 5-46.