



Научная статья

УДК 549.514.81:553.411.3 (234.88)

## Уникальные титановые месторождения Тимана: проблемы генезиса и возраста

А.Б.МАКЕЕВ<sup>1</sup>✉, Н.И.БРЯНЧАНИНОВА<sup>2</sup>, А.О.КРАСОТКИНА<sup>3</sup><sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия<sup>2</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия<sup>3</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

**Как цитировать эту статью:** А.Б.Макеев, Н.И.Брянчанинова, А.О.Красоткина. Уникальные титановые месторождения Тимана: проблемы генезиса и возраста // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 275-289.  
DOI: 10.31897/PMI.2022.32

**Аннотация.** Приводится критический разбор гипотез образования, возраста и источников вещества крупных титановых месторождений Тимана, считавшихся ранее древними погребенными россыпями, образовавшимися по корам выветривания рифейских сланцев. Обсуждается альтернативная гидротермально-метаморфическая гипотеза образования этих месторождений и источника рудного вещества. Установлено, что поступивший разновозрастный циркон (570-3200 млн лет), как и два других геохронометра – рутил и монацит, – претерпели общее для всех разновидностей термальное воздействие в результате гидротермального процесса возрастом около 600 млн лет. Согласно современным представлениям, температура закрытия U-Pb системы в рутиле превышает 500 °С, что предполагает высокотемпературные условия гидротермальной переработки рутила при формировании рассматриваемых месторождений в рифейское время.

**Ключевые слова:** Пижемское и Ярегское месторождения; гипотезы образования; россыпная и гидротермально-метаморфогенная гипотезы образования; источники вещества; рифейские сланцы; лампрофиты

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках тем госзадания ИГЕМ РАН (№ FMMN-2021-0005) и ГИН РАН (№ 135-2019-0049), аналитические исследования осуществлены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-35-60001).

Поступила: 14.03.2022

Принята: 13.05.2022

Онлайн: 13.07.2022

**Введение.** В структуре общероссийских запасов доля двух тиманских титановых месторождений – Ярегского нефтетитанового (Южный Тиман) и Пижемского титан-циркониевого (Средний Тиман) – приближается к 80 %. В Ярегском месторождении ФБУ ГКЗ утверждены запасы 65 млн т  $TiO_2$  по категориям А + В + С, а запасы Пижемского месторождения на 1/9 части его площади – 12,8 млн т  $TiO_2$  по категориям С<sub>1</sub> + С<sub>2</sub>. Прогнозные ресурсы титановых руд Пижемского месторождения оценены по категории Р<sub>1</sub> – 2,5 млрд т (на лицензионной площади 35 км<sup>2</sup> АО «РУСТИТАН») и Р<sub>2</sub> – 7 млрд т всего месторождения [1]. Ярегское месторождение может отрабатываться шахтным способом, а Пижемское – открытым карьерным. Месторождения расположены в единой тиманской структуре на расстоянии не более 230 км друг от друга, обладают близким геологическим строением [1, 2]: залегают на рифейских глинистых сланцах фундамента и перекрыты вулканогенно-осадочными толщами среднего-верхнего девона.

Освоение данных месторождений актуально, так как на сотни лет снимет напряжение в поисках сырья и покроет все потребности России в металлическом титане, белых и цветных пигментах на основе  $TiO_2$ . Также особый промышленный интерес представляют вышележащие кварцевые песчаники стекольного качества. Пижемское месторождение отличается более сложным полиминеральным составом [3] и главными титановыми фазами (в Пижемском месторождении – псевдорутит и лейкоксен, а в Ярегском – лейкоксен). Ярегское нефтетитановое месторождение было открыто более 80 лет назад, его первооткрывателем в 1973 г. был признан В.А.Калужный.



Более 60 лет назад была отмечена титановая минерализация в бортах рек Умба и Пижма, Ухтинской геолого-разведочной экспедицией проводились поисковые работы. В 2010-20-е годы на Пижемском месторождении АО «РУСТИТАН» были проведены геолого-разведочные работы с минералого-технологическими исследованиями и подсчетом запасов руд, утвержденных ГКЗ в 2020 г. В 2021 г. Роснедра признало первооткрывателем АО «РУСТИТАН».

Вовлечь в отработку большие запасы тиманских нестандартных титановых руд до сих пор было невозможно из-за отсутствия эффективной промышленной технологии их обогащения и переработки. Однако в последние годы лабораторные исследования ведутся весьма успешно. Опытные работы химиков и технологов в ИМЕТ РАН с лейкоксеновыми рудами Тимана дают надежду на успешное вовлечение месторождений в промышленную отработку по единой экологически чистой технологии путем восстановительного обжига концентратов для отделения лейкоксена от кварца [4] и автоклавное обескремнивание титановых фаз с помощью известкового молочка [5]. Технологические исследования позволили выявить новые критерии для понимания природы и условий образования кварц-лейкоксеновых месторождений.

В 1950-60-х годах В.А.Калюжным была выдвинута гипотеза [6-9]: источником титановых скоплений в открытом Ярегском месторождении Тимана могли быть толщи метаморфизованных рифейских глинистых сланцев, содержащие ильменит и лейкоксен, по которым образовались коры выветривания. Разрушение, перемыв и переотложение материала кор выветривания по сланцам привели к образованию промышленной титановой россыпи Яреги. Гипотеза была подхвачена другими исследователями Тимана [10-14] и стала общепринятой.

С момента обнаружения титановой минерализации (1959) в бассейне р. Пижма возраст титановосной толщи, расположенной в северном периклинальном замыкании Вольско-Вымской гряды Среднего Тимана, условно был принят за среднедевонский – эйфельский [13]. Толща стала называться малоручейской свитой ( $D_2mr$ ). Отсутствие какой-либо ископаемой флоры и фауны в титановосной песчано-глинистой толще не позволяет считать это допущение окончательным. Выше залегают мономинеральные кварцевые песчаники с прослоями ленточных глин пижемской свиты ( $D_2pz$ ). Именно глины содержат споры и пыльцу старооскольского надгоризонта эйфельского яруса среднего девона, поэтому нижезалегающая немая титановосная толща должна считаться до-среднедевонской. Геологическое строение района исследований и других месторождений можно найти в [1, 2, 15, 16].

Проведенный анализ особенностей минерального состава тиманских россыпей и их коренных источников, сравнение строения Ярегской россыпи с Пижемской и Ичетьюской показывает их качественную аналогию [12, 17]. Их считают продуктами единого девонского кор- и россыпеобразовательного процесса на Тимане [2, 6, 7, 18]. Возраст Пижемской россыпи предлагается считать раннедевонским (эмским), что сопоставимо с возрастом девонских латеритных бокситов Тимана, образовавшихся по корам выветривания карбонатно-глинистых пород позднепротерозойского фундамента [12].

Россыпь – это место локализации сконцентрированного на ограниченном пространстве полезного ископаемого (или нескольких их видов), представленного свободными зернами порообразующих и рудных минералов, фаз или их агрегатов. При этом полезное ископаемое высвобождено из материнской породы при ее дезинтеграции и перемещено на разные расстояния, перемываясь и концентрируясь в водных потоках. Образующееся рудное тело (россыпь) находится, как правило, во вторичном коллекторе – рыхлой осадочной породе [19].

Цель работы – рассмотреть состоятельность установившихся представлений о происхождении гигантских титановых месторождений Тимана: Ярегского нефтетитанового (Южный Тиман), Пижемского титан-циркониевого (Средний Тиман) и находящегося над ним полиминерального проявления Ичетью – на основе современных фактических данных по геологии, минералогии и геохимии месторождений. Дать обоснование альтернативной гидротермально-метаморфогенной гипотезы генезиса месторождений, их возраста и источников вещества. Выверенная гипотеза актуальна в связи с выработкой действенных поисковых признаков для выявления новых подобных месторождений как на Тимане, так и в других регионах России.



**Обсуждение.** На Тимане широко распространены метаморфизованные (зеленосланцевая фация) первично-осадочные пелитоморфные глинистые сланцы рифейского возраста. Они выходят на дневную поверхность на больших площадях в пределах Среднего Тимана (Четласский камень, Вольско-Вымская гряда) и в меньшей степени Южного, Северного Тимана и п-ва Канин. Рифейские глинистые сланцы вскрыты горными выработками (скважинами) на лицензионных площадях Пижемского и Ярегского титановых месторождений и доступны для исследования. Они содержат акцессорную титановую минерализацию, представленную ильменитом и в меньшей степени титаномагнетитом. Содержание  $TiO_2$  в сланцах варьируется от 0,6 до 1,2 и в среднем приближается к 0,87 мас.% [20].

По результатам исследований [2, 11, 14] установлен особый типохимизм акцессорного ильменита из рифейских сланцев, заключающийся в наименьшей его изоморфной емкости по отношению к ванадию, ниобию, никелю, хрому и минимальному содержанию магния. В то же время он содержит высокую типоморфную примесь марганца. Сланцевый ильменит имеет своеобразный хорошо выраженный «химический портрет» – довольно чистый по отношению к обычным для него изоморфным примесям. По ильмениту в процессе метаморфизма в сланцах развивается лейкоксен, преимущественно анатазовый, и в меньших количествах – анатаз-рутиловый. В этих же лейкоксенсодержащих сланцах присутствует сидерит, который не рассматривается как побочный продукт реакции выноса железа из ильменита. Большую работу по диагностике полиморфов  $TiO_2$  (рутила, анатаза и брукита) в сланцах и рудных телах Ярегского месторождения провела И.В.Швецова [14]. Установлено, что по морфологическим признакам (рис.1) в полированных препаратах и рентгеноструктурному анализу в крупной фракции (+0,52-0,32 мм) ярегского лейкоксена преобладает рутиловый компонент (до 80 %), в средней фракции увеличивается доля рутил-анализового лейкоксена, а в мелкой (0,08-0,03 мм) преобладает анатазовый лейкоксен (до 60 %). В этом же направлении уменьшается содержание  $SiO_2$  в лейкоксене и увеличивается доля  $TiO_2$ . Среднее соотношение полиморфов  $TiO_2$  в пробах рудного лейкоксена – рутиловый:рутил-анатазовый:анатазовый – 70:20:10. Остаточный и измененный ильменит – псевдорутил – присутствуют в небольшом количестве (до 6 % от суммы титановых фаз) в глубоких горизонтах Ярегского месторождения в водонасыщенных сортах рудных песчаников. В Пижемском месторождении наибольшее распространение получил рутиловый лейкоксен. При изучении в препаратах плоских зерен желтого лейкоксена на их поверхности часто наблюдаются вторичные выделения мелких кристаллов голубого анатаза размером до нескольких микрон в виде своеобразных венчиков. В полированных препаратах анатаз не обнаружен.

Особенностью лейкоксена, которую не учитывают в россыпной модели, является его хрупкость, из-за которой он не может перемещаться в водных потоках на большие расстояния, – он неизбежно разрушается и перетирается, превращаясь в пылевидную фракцию. Критический разбор положений россыпной гипотезы представлен в таблице.

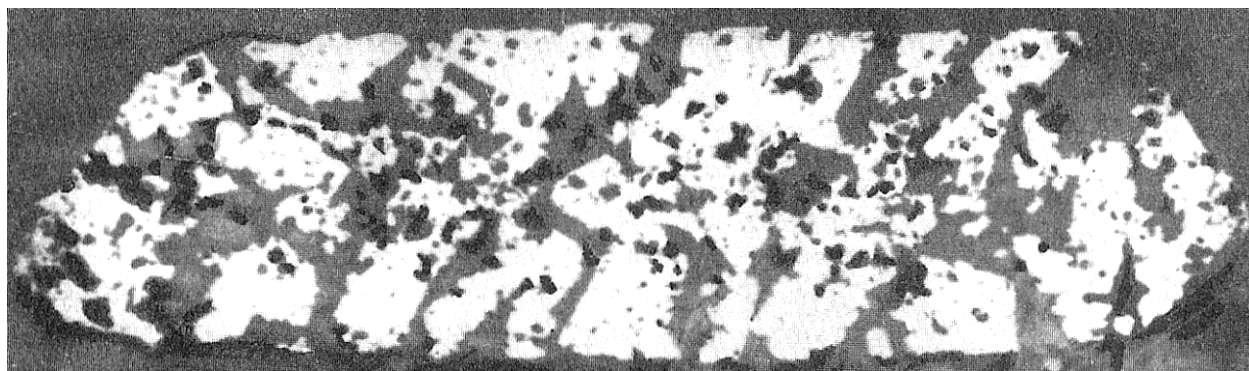


Рис.1. Уплощенное зерно анатазового лейкоксена (длина около 300 мкм) из рифейских глинистых сланцев Южного Тимана [14] (белое – анатаз, серое – кварц)



## Сопоставление положений россыпной гипотезы и фактических данных

| Положения гипотезы                                                                                                                                                                                   | Критика                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| По рифейским глинистым сланцам развиваются зрелые линейные и площадные химические коры выветривания, из которых могли вымываться кристаллы ильменита, зерна лейкоксена и другие акцессории           | На Тимане, по данным поискового и разведочного бурения, известны коры выветривания по диабазам, гранитам и известковисто-мергелистым породам (Вежаю-Ворыквинское бокситовое месторождение), по которым образовались бокситовые проявления и месторождения. Но никто никогда не видел и не описывал зрелых классических зональных химических кор выветривания по глинистым сланцам. По наблюдениям на дневной поверхности Вольско-Вымской гряды и описанию керн разведочных скважин известна только первая стадия разрушения твердых пород глинистых сланцев, их дезинтеграция с образованием дресвы сланцев. Ни в опубликованных, ни в отчетных материалах не указываются пункты находок в конкретных обнажениях, нет описания химического состава кор выветривания, т.е. размываться нечему                                                                                                                                              |
| Концентрирование титановых минералов и фаз происходит путем длительного перемыва кор выветривания по глинистым сланцам, переноса их водными потоками с образованием россыпей                         | Размерность кварца глинистых сланцев не соответствует размерности кварцевых частиц титаноносных толщ: в сланцах размерность зерен кварца и других минералов менее 0,1 мм, а в песчаниках и гравелитах рассматриваемых месторождений – 0,2-2 и 3-10 мм соответственно (рис.2, 3). Пижемские и ярегские титаноносные гравелиты и песчаники сложены кластогенным неокатанным кварцем (ближнего сноса), по всем признакам происходящим из древних неопротерозойских кварцитов. Для образования гигантских месторождений потребовались бы коры выветривания по сланцам мощностью более 500 м. Кроме двух известных месторождений отсутствует цепочка даже мелких титановых проявлений по всей длине гряд                                                                                                                                                                                                                                       |
| Ярегское и Пижемское титановые месторождения – прибрежно-морские россыпи                                                                                                                             | Характерными признаками прибрежно-морских (пляжевых) россыпей является плоская хорошо окатанная галька и битые ракушки (морская биота), но их в обоих месторождениях нет. Гравелиты состоят из кластогенной мелкой дресвы из угловатых обломков жильного кварца и кварцита, а песчаная фракция пород из кластогенного угловатого неокатанного кварца без признаков дальнего переноса и абразии (рис.2, 3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Возраст Ярегского и Пижемского титановых месторождений – эйфельский (D <sub>2</sub> )                                                                                                                | Возраст Ярегского месторождения был ошибочно принят за среднедевонский, так как в руде была найдена среднедевонская пыльца. Позже было установлено, что присутствует также и позднедевонская пыльца. После образования титаноносных песчаников Ярегского месторождения мигрирующая в них нефть, имеющая собственный пермско-юрский возраст [21], принесла с собой среднепозднедевонскую флору (споры и пыльцу) девонских растений [22]. Песчано-глинистые титаноносные породы Пижемского месторождения не содержат руководящей биоты. Возраст малоручейской титаноносной толщи Пижемского месторождения безосновательно принят как среднедевонский (D <sub>2</sub> mr). Истинный возраст образования этих месторождений значительно древнее – неопротерозойский (рифейский; PR <sub>3</sub> mr), который может быть установлен только изотопными методами. Возраст Пижемского месторождения определен Rb-Sr-методом в 685±30 млн лет [23] |
| Ильменит преобразуется в лейкоксен в глинистых сланцах в гипергенных условиях                                                                                                                        | Это положение гипотезы не доказано. Для выноса железа из ильменита и импрегнирование кварцем пор в сагенитовой рутиловой или анатазовой решетке с образованием лейкоксена требуются гидротермальные условия: наличие во флюиде углекислоты и относительно высокая температура (150-250 °C) для переноса в растворенном виде бикарбоната железа и кремнекислоты (SiO <sub>2</sub> ) [6]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| В гипергенных условиях происходят полиморфные превращения TiO <sub>2</sub> – метастабильный анатаз превращается в рутил                                                                              | Исследователями тиманских рифейских глинистых сланцев отмечается, что в них по ильмениту развивается преимущественно анатазовый лейкоксен [8, 11, 14, 16]. В Ярегском и Пижемском месторождениях наибольшее распространение получил рутиловый лейкоксен. Соотношение полиморфов TiO <sub>2</sub> в месторождениях различно. Экспериментальные данные свидетельствуют о высокотемпературных условиях полиморфного перехода анатаз → рутил – 850-920 °C [24]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Лейкоксен образуется в гипергенных условиях из ильменита в титаноносных песчаниках в щелочной восстановительной среде [14] либо наследуется как акцессорная фаза, высвобождаясь из глинистых сланцев | Это представление ошибочное. Лейкоксен образуется в процессе гидротермального метаморфического преобразования ильменита в многостадийном последовательном химическом процессе. Замещение ильменита лейкоксеном проходит с выносом железа благодаря его взаимодействию с углекислотным флюидом и образованием сидерита (FeCO <sub>3</sub> ) через фазы: железистого рутила (нигрина), псевдорутила, далее в лейкоксен [3, 6]. Сидерит в нижней малоручейской                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |



Окончание таблицы

| Положения гипотезы                                                                   | Критика                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ильменит рифейских сланцевых толщ послужил источником титана тиманских месторождений | титаноносной толще Пижемского месторождения окисляется при высоких Eh до гематита. В лейкоксен входят микровключения кварца, монацита, ксенотима, колумбита и т.д., которые отлагаются в порах сагенитовой решетки рутила из гидротермального флюида в кислых условиях. Условия образования лейкоксена совершенно другие – кислая окислительная среда и относительно высокая температура<br><br>Типоморфные особенности реликтового ильменита в титановых месторождениях Тимана не соответствуют типохимизму сланцевого ильменита, чистого и содержащего только обычную примесь Mn. В месторождениях реликтовый ильменит содержит значительные изоморфные примеси Mg, Mn, V, Nb, Cr. Такой ильменит – типоморфный минерал щелочно-ультраосновных пород [3, 16] |

Значительно позже для источника вещества и генезиса Ярегского месторождения В.Г.Колокольцевым была предложена альтернативная гипотеза [25], которая предполагала, что ярегский лейкоксен – это продукт конвективного переноса рудного вещества из пород фундамента в уже сформированные осадочные кварцевые песчаники в результате гидротермально-метасоматического процесса. В качестве источника рудного вещества также рассматривались рифейские глинистые сланцы, обогащенные ильменитом и анатазовым лейкоксеном [26]. Это предположение

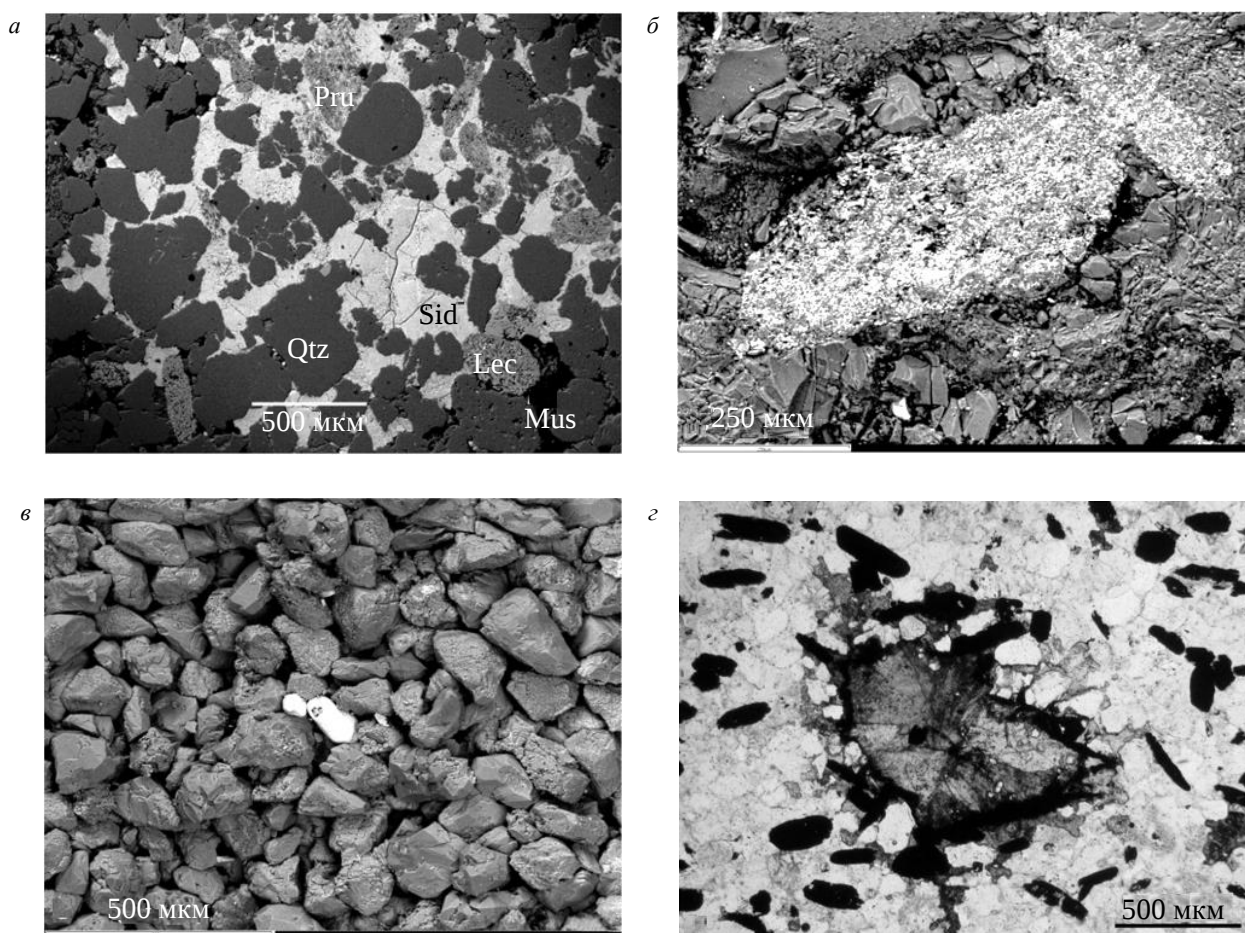


Рис.2. Электронно-микроскопические изображения (BSE): а – кластогенный кварцевый (Qtz) песчаник (PR<sub>3mr</sub><sup>2</sup>) с рутиловым лейкоксеном (Lec) и псевдорутилом (Pru) в сидеритовом (Sid) и гидромусковитом (Mus) цементе; б – псевдоморфоза рутилового лейкоксена по ильмениту в красноцветном титаноносном песчанике нижней толщи (PR<sub>3mr</sub><sup>1</sup>); в – терригенно-осадочный кварцевый песчаник (D<sub>2pz</sub>) стекольного качества (SiO<sub>2</sub> – 96-98 мас.%), цемент отсутствует (белое – зерно циркона); з – изображение шлифа (без анализатора) титаноносного песчаника PR<sub>3mr</sub><sup>2</sup> с многочисленными черными зернами рутилового лейкоксена и псевдорутила (кварц – белый, в центре – светло-коричневое выделение сидерита)

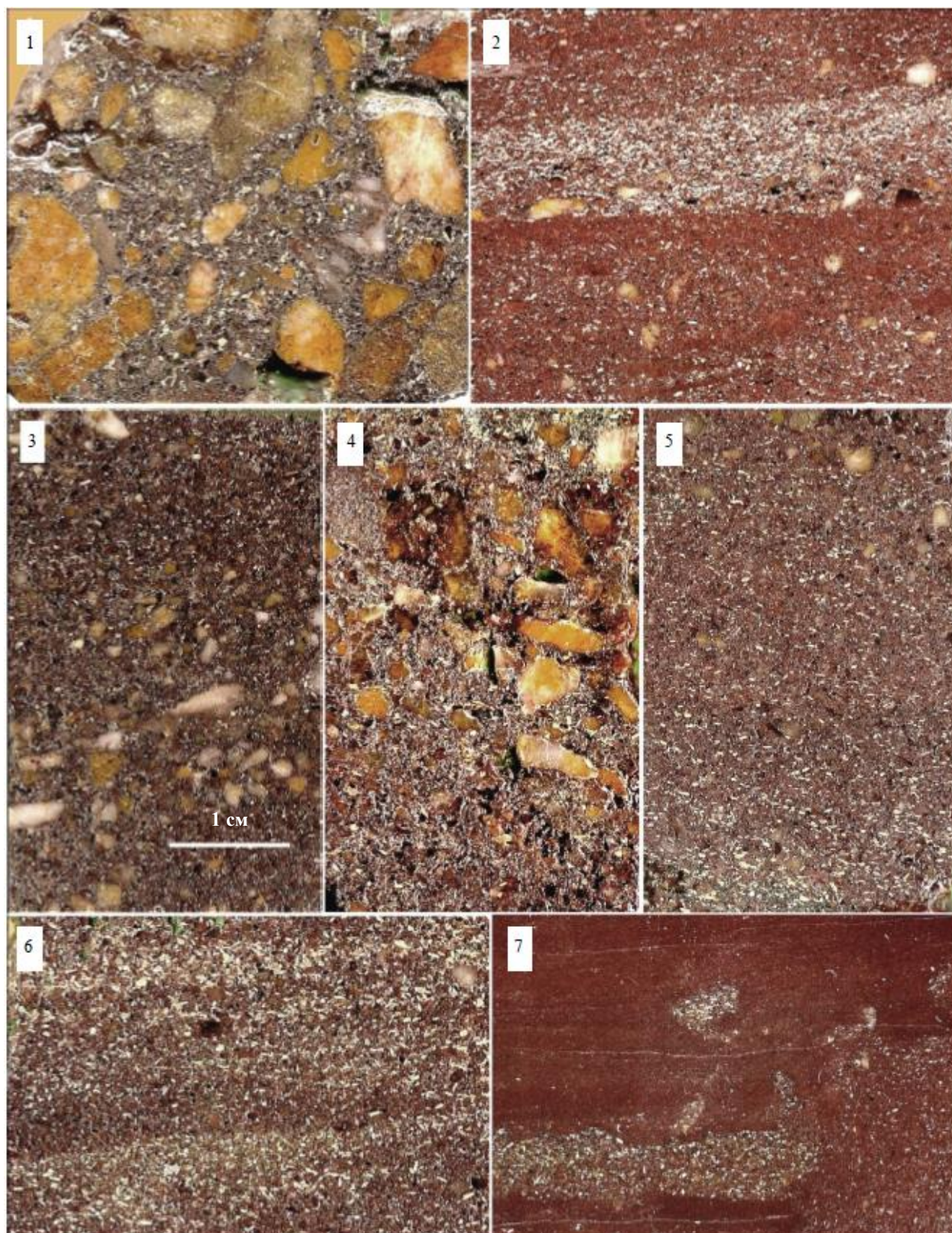


Рис.3. Морфологические особенности титаноносных пород Пижемского месторождения

Кластогенные псефиты нижней красноцветной малоручейской толщи  $PR_3mg^1$  и матрикс представлены обломочным жильным кварцем и кварцитом, заполнитель – мелкие обломки того же кварца песчаной фракции:

1 – конглобрекция; 2-4 – гравелиты; 5, 6 – песчаники; 7 – алевро-песчаник.

Сыпь желтого рутилового лейкоксена с размером зерен 100-500 мкм, модальный размер – 300 мкм (на изображении представлены сканированные полированные кусочки пород 4-5 см с одинаковым увеличением)



снимает противоречия гипотезы В.А.Калюжного – в качестве исходных титановых фаз не требуется переносить в песчаники сланцевые «чистый» ильменит и анатазовый лейкоксен из сланцев. Критика гипотезы В.Г.Колокольцева заключается в том, что в Ярегском месторождении не проявлены характерные признаки гидротермального процесса. Отсутствуют зональность, жилы кварца и карбонатов, крупные выделения и кристаллы рудных и жильных минералов, метасоматическое воздействие на вмещающие породы и др. Но полное исключение возможности переноса титана гидротермальным флюидом считается преждевременным решением. Одна из последних моделей предполагает, что ярегские песчаники имеют неопротерозойский возраст, а источником рудного вещества были лампрофиры для титановых фаз и граниты для циркона и других редких и редкоземельных минералов [22].

По классификации ФГБУ ВИМС [27] метаморфогенные титановые месторождения с лейкоксом (одно из которых – Ярегское нефтетитановое) относятся к лейкоксен-кварцевым (по главным минеральным формам) коренным месторождениям. Пижемское месторождение отличается от Ярегского более сложным полиминеральным составом [3].

Пижемское месторождение уникально по запасам и минеральному составу руд: главные титановые фазы – псевдуртил и лейкоксен. Подобных месторождений больше нет в мире. В классификации титановорудных месторождений среди метаморфогенных месторождений следует выделить новый генетический подтип – псевдуртил-лейкоксен-кварцевый [1, 6].

В строении Четласской гряды, расположенной в 60 км юго-западнее Вольско-Вымской гряды (расстояние от Пижемского месторождения), принимают участие, наряду с глинистыми сланцами, мощные толщи кварцитов, выходящие на дневную поверхность. Эта толща поздне- и среднепротерозойских пород (четласской, аныюгской, визингской, новобобровской, светлинской свит) на 100-200 млн лет древнее глинистых сланцев лунвожской свиты (PR<sub>3</sub>lv) и 816,3±5,2 млн лет Вольско-Вымской гряды [20, 28]. Можно предположить, что эти более древние толщи слагают и более глубокую часть Вольско-Вымской гряды. В этом случае именно кварциты из более древних свит, не выходящие на дневную поверхность в Вольско-Вымской гряде, могут служить источником кварца песчаников и конглобрекций рудных толщ. Тогда следует предположение о глубинном вертикальном перемещении вещества.

Интересной особенностью Ичетью и Пижемского месторождения является состав монацита [22, 29]. В отличие от монацита из россыпей всего мира, имеющих повышенное содержание в своем составе тория (5-10 мас.% ThO<sub>2</sub>), характерной чертой монацита из проявления Ичетью и Пижемского месторождения является низкое содержание ThO<sub>2</sub> (в среднем 0,5 мас.%). Игольчатая, хрупкая форма новообразованного рутила в рудах Пижемского месторождения свидетельствует об образовании рутила *in situ* [30].

Сомнения в россыпной природе Пижемского месторождения вызывает морфология его рудных залежей – ограниченная площадь (распространение на 6×18 км, т.е. около 90 км<sup>2</sup>) при мощности рудных пластов от 30 до 140 м, островное чашеобразное строение рудных тел.

Гидротермально-метаморфогенная (флюидизатная) модель образования Ярегского и Пижемского месторождений разрабатывается в серии работ [1, 3, 31, 32]. Флюидизатную модель следует показать на примере проявления Ичетью, расположенного строго над Пижемским титановым месторождением. Его аналоги по минеральному составу и особенностям структуры пласта неизвестны. Минеральный (видовой) состав Пижемского месторождения и проявления Ичетью совпадает примерно на 80 %. Полиминеральное алмаз-золото-редкоземельно-редкометалльно-титановое проявление Ичетью – это необычный по генезису, строению и минеральному составу промежуточный коллектор – пласт (мощность 0,5-1,5 м) прерывистой пятнисто-линзовидной формы, сложенный конглобрекцией из слабоокатанной гальки, обломков кварцевого песчаника с песчаным кварцевым наполнителем.

Выход тяжелой фракции составляет 0,2-2,0 кг/м<sup>3</sup>. В конглобрекциях совмещены шесть парагенетических минеральных ассоциаций из нескольких коренных эндогенных источников: золото-кварцевая; алмазная (с минералами спутниками); титановая (Mg, Mn, V, Nb, Cr-ильменит-Fe-рутил-псевдуртил-лейкоксеновая); ниобиевая (Nb-рутил-рутил-колумбитовая); цирконовая



(со ставролитом, турмалином, амфиболом и гранатом); редкоземельная (ксенотим-монацит-куларит-флоренситовая). Соотношение минеральных ассоциаций в шлиховых пробах по площади распространения конглобрекчиевого пласта сильно варьируется. Можно предположить, что под исследуемой территорией Пижемского месторождения в рифейской кварцито-сланцевой толще находилось несколько эндогенных проявлений, расположенных на разной глубине в вертикальной колонке кристаллического фундамента. Они могли послужить источником минеральных ассоциаций, которые оторваны во времени друг от друга, но в результате одного флюидизатного процесса все они совмещены в конглобрекчиевом пласте Ичетью.

На дневной поверхности в исследуемом регионе Вольско-Вымской гряды неизвестно ни одного проявления с подобными минеральными ассоциациями (кроме Пижемского титанового месторождения). Однако существуют аналоги в соседней гряде (Четласский Камень) в 60-80 км юго-западнее проявления Ичетью, в более древней по возрасту неопротерозойской сланцево-кварцитовый толще визингской свиты (PR<sub>3vs</sub>). Это позволяет предполагать, что и на Вольско-Вымской гряде ниже сланцев неопротерозоя PR<sub>3lv</sub> залегает подобная толща PR<sub>3vs</sub>. Разрушение и перемещение в вертикальном направлении материала такого разреза могло дать разнообразный минеральный видовой состав (более 50 минеральных видов) пласта Ичетью.

Пласт Ичетью – образование более молодое в составе подошвенной части толщи кварцевых песчаников среднедевонской пижемской свиты (D<sub>2pz</sub>) и внедрено в нее, вероятно, в позднедевонское время синхронно с базальтами. Это доказывается следующими фактами и наблюдениями:

1. Прерывистая пятнисто-линзовидная форма тел.
2. Наличие будин пижемских песчаников (размером до 1 м) внутри пласта Ичетью, закалочных осветленных термальных контактов будин и обложение их со всех сторон материалом конглобрекчии (например, в обнажении Золотой Камень).
3. Задokumentирован случай вертикального расположения алмазоносного конглобрекчиевого пласта и пересечения им нижележащих пород малоручейской толщи PR<sub>3mr</sub><sup>3</sup> (расчистка в карьере К-100, правый борт р. Средняя). Размер фрагмента пласта, похожего на бетонную вертикальную стену, в расчистке: длина – 6 м; мощность – 0,5 м; прослежен на глубину вертикального вскрытия пласта – 2,5 м. В длину и глубину пласт вскрыт неполностью из-за технических возможностей. Это прямое наблюдение подводящего канала или ножки силла, то есть порода внедрена снизу.
4. Наличие в составе конглобрекчии обломков рифейских пород: глинистых сланцев; слабоокатанных кварцитов; кварцевых жил; слабоокатанных кристаллов кварца до 1-3 см; песчаников пижемской свиты; свежих базальтов (по облику похожих на позднедевонские базальты). Форма гальки пород – неправильная сферическая либо слабо вытянутая эллиптическая (с вогнутыми кривыми поверхностями), а не уплощенная, что исключает предположение о генезисе пласта как «пляжевой морской россыпи».
5. Кластогенные неокатанные зерна кварца в составе наполнителя пласта доказывают ближний источник этого материала.
6. Количественный состав изоморфных элементов-примесей в мелкозернистом кварце наполнителя пласта (Al, Ge, Ti) по данным электронного парамагнитного резонанса резко отличны от окатанных зерен кварца пижемской свиты D<sub>2pz</sub>.
7. Результаты определения возраста циркона с широкими вариациями значений от позднего протерозоя до раннего архея [30] при отсутствии фанерозойских значений свидетельствуют в пользу вертикального восходящего движения материала при формировании пласта Ичетью.

Все эти факты доказывают позднюю инъекцию пласта Ичетью в консолидированную литифицированную толщу среднедевонских песчаников по типу флюидизитов или туффизитов. Материал флюидизитов имел повышенную температуру, о чем свидетельствуют термальные закалочные контакты будин (размером до 1 м) и обломков вмещающих кварцевых песчаников пижемской свиты (размером 2-10 см) в составе пласта конглобрекчии, а также гидротермальное преобразование некоторых рудных минералов конглобрекчии: высокоиттриевого циркона [30, 31]; перекристаллизация с очищением от примесей ниобиевого рутила [32]; каймы бадделеита на цирконе; цинковые каймы на хромшпинелиде [33]; каймы флоренсита на куларите и алмазе [15]; мелкие щетки кристалликов анатаза на лейкоксене и др.



Точка зрения о россыпной природе проявления Ичетью и титановых месторождений упирается еще в одну проблему – установление направления сноса материала по латерали и фациальной принадлежности «псевдороссыпей» (аллювиальная, дельтовая, эоловая, морской пляж и т.д.).

Также считаем ошибочной точку зрения о том, что нефтетитановое Ярегское месторождение – прямой аналог Пижемского [12, 17]. Условно осадочное происхождение пород Ярегского месторождения доказывается многочисленными находками остатков биоты (спор и пыльцы) как среднего, так и позднего девона. Однако можно предположить, что пыльцу девонского возраста могла принести нефть (пермско-юрского возраста [21]), мигрирующая в древние суперпористые песчаные титаноносные коллекторы. Лейкоксен-кварцевые породы Пижемского месторождения никогда не были первично-осадочными. Агрессивность среды при формировании месторождения не способствовала какой-либо жизни и сохранению ее остатков.

Возраст Пижемского месторождения, как показано изотопно-геохимическими Rb-Sr исследованиями, значительно древнее, чем принято считать, – рифейский ( $685 \pm 30$  млн лет) [23]. Рассматриваемая модель образования Пижемского месторождения и проявления Ичетью предусматривает вертикальное перемещение огромных масс вещества по типу грязевых вулканов в непрерывно-пульсационном режиме и заполнение отрицательных форм рельефа кристаллического фундамента, сложенного глинистыми сланцами.

Строение рудного пласта Пижемского месторождения подобно строению флюидизатной кальдеры. Такое уточненное строение титаноносной малоручейской толщи выявлено в процессе геолого-разведочных работ с использованием поискового бурения в 2011-2013 гг. на лицензионной площади в  $35 \text{ км}^2$ , осуществляемого ФГУНПП «Аэрогеология» по заказу АО «РУСТИТАН» (владельца сквозной лицензии на поиски, разведку и добычу титана). С помощью компьютерного моделирования построена объемная модель рудного пласта и уточнена морфология титаноносной малоручейской толщи [1]. Рудная толща имеет ячеистое строение и заполняет все отрицательные формы изрезанного рельефа рифейского фундамента, разница в абсолютных отметках кровли которого превышает 300 м. Наиболее полный разрез титаноносных пород с трехчленным делением малоручейской толщи ( $\text{PR}_3\text{mr}^{1-3}$ ) наблюдается только в отрицательных формах рельефа фундамента, где присутствует конглобрекчиевый пласт Ичетью.

Отмечена аналогия со строением грязевых вулканов, которые образуют вулканические конусы (с их склонов материал сползает в низины). Таких холмов и чашеобразных впадин множество, они создают ячеистую структуру рудного пласта. Нет никаких морфологических признаков присутствия древних речных долин. Чашеобразные структуры залегания титаноносной толщи видны и на геологических разрезах [1]. Предполагается, что коренным источником титановых и многих других индикаторных минералов были дайки лампрофиров (спессартиты и комптониты), поля которых широко распространены на соседней гряде (Четласский Камень) [16, 34] и, предположительно, залегают на глубине и под Вольско-Вымской грядой. Доказательством служат типоморфные особенности индикаторных минералов в Пижемском титановом месторождении [3] и полиминеральном рудопроявлении Ичетью (Mg, Mn, V, Nb, Cr-ильменита, Zn-хромшпинелида [33], редкого граната с мэджоритовой компонентой – спутника алмаза [16], биотита, амфиболов и др.), совпадающие по химическому составу с породообразующими и акцессорными минералами лампрофиров [15, 30].

Движущим фактором флюидизатного процесса могли служить метаморфогенные воды, которые встречались с внедряющимися горячими магмами или лампрофирами, внедрявшимися на возрастном рубеже 600-800 млн лет (именно такого возраста лампрофиры на Четласском Камне) [34]. Перегретый флюид разрушал и дезинтегрировал лампрофиры с образованием кварца, каолинита, гидрослюда, рудных титановых минералов и др. Все эти фазы устремлялись вверх во флюидизатном потоке, захватывали из древних толщ зерна кварца из кварцитов, жильный кварц с золотом, рудные минералы (монацит, ксенотим, ниобиевый рутил, колумбит, рутил) из мелких проявлений, алмазы из промежуточных коллекторов. Циркон мог извлекаться последовательно из разнообразных пород (в том числе из гранитов) всей толщи фундамента разного возраста – от архея до позднего протерозоя.



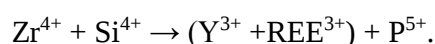
Агрессивный перегретый водно-углекислотный флюид преобразовывал ильменит в лейкоксен при высокой температуре  $510 \pm 35$  °С, согласно данным расчета по титан-цирконовому геотермометру [35, 36] по схеме [1, 6]:



Пижемское месторождение могло формироваться долго, преобразование минералов продолжаться как на глубине в присутствии высокотемпературного флюида, так и в низкотемпературную гидротермальную стадию уже на поверхности. Источником железа для образования сидерит-гематитового цемента песчаников в нижней толще малоручейской свиты ( $\text{PR}_{3\text{m}}^1$ ) могли быть разрушающиеся слюды и ильменит. Ожелезнение песчаников происходило в гидротермальную стадию. Углекислота имела глубинное происхождение, о чем свидетельствует изотопный состав углерода в сидерите [18], который близок к составу углерода алмазов из проявления Ичетью, происходящих из мантийных эклогитов [37]. Гидротермально-метаморфогенная модель образования Пижемского месторождения и рудопроявления Ичетью снимает многие противоречия россыпной модели.

Глубинный источник вещества дает информацию о происхождении кластогенного кварца песчаников псаммитовой и гравелитовой размерности (рис.3), которого нет на поверхности и в сланцах. То же самое относится ко всем рудным минералам, проявления которых неизвестны в подстилающей толще глинистых сланцев лунвожской свиты. Происхождение алмаза в конглобрекции Ичетью невозможно из неалмазоносных кимберлитовых трубок (Умбинской, Средненской и Водораздельной), находящихся в 12-14 км юго-восточнее рудного поля, так как возраст трубок позднедевонский, а конглобрекция Ичетью локализуется в среднедевонских песчаниках. Алмазы, находящиеся в проявлении Ичетью, имеют иное, глубинное происхождение наряду с другими минеральными компонентами рассматриваемых месторождений. Рудопроявление Ичетью является перспективным в отношении ресурсов циркона, Au, Y, Nb, Ce, La, Nd. Среди минерального разнообразия проявления Ичетью в ряде проб во фракции 0,10-0,25 мм циркон составляет более 50 вес.% от тяжелого шлиха и представляет промышленный интерес.

Отдельного внимания заслуживает циркон как с точек зрения генетико-информационного анализа, так и промышленной. Запасы циркона по категории  $C_2$  на площади 12 км<sup>2</sup> Центрального участка Пижемского месторождения составили 151 тыс. т  $\text{ZrO}_2$  [1]; по категории  $P_1$  только на лицензионном участке Пижемского месторождения площадью 35 км<sup>2</sup> приближаются к 1 млн т (по данным АО «РУСТИТАН»). Вероятным источником циркона являются породы фундамента Тимана, что доказано его характерными геохимическими особенностями – изоморфизмом редкоземельных элементов по ксенотимовой схеме [30, 31]:



Возможно, этим источником были граниты возрастом около 1200 и 1500 млн лет, отвечающим наиболее интенсивным пикам на возрастных диаграммах для обоих объектов. Это обстоятельство не допускает транспортировку циркона из смежных регионов, так как ни на Урале, ни на Фенноскандинавском щите подобных геохимических разновидностей циркона не обнаружено.

Трудно представить, чтобы огромные массы циркона были перенесены ветром или морскими течениями за тысячи километров в направлении от Балтийского щита или Урала, образовав Пижемское циркон-титановое месторождение и вышележащее алмаз-золото-редкометалльно-редкоземельно-титановое проявление Ичетью. Морфологические особенности циркона – средняя окатанность и хорошая сохранность – позволяют предположить, что зерна и кристаллы циркона имеют ближний источник сноса. Направление перемещения рудных масс было вертикальным, а не латеральным.

На основе проведенных минералого-геохронологических исследований можно предположить, что фундамент Среднего Тимана (наиболее вероятный источник циркона) сложен породами протерозойского возраста и, вероятно, является продолжением Беломорского подвижного пояса. Таким образом, палеопротерозойская коллизионная структура, ориентированная в северо-западном направлении, имеет продолжение под Мезенскую синеклизу и Средний Тиман. Изотопно-геохимические определения возраста циркона Пижемского месторождения и проявления Ичетью



(570-3200 млн лет) [30, 31] характеризуют именно возрастные особенности пород, слагающих тиманский фундамент. Близкие соотношения возрастных характеристик циркона Пижемского месторождения и рудопроявления Ичетью позволяют сделать вывод о едином источнике циркона в обоих рудных объектах. Возрастные рубежи (от архея до рифея-венда) повторяются в изотопно-геохимических определениях циркона, монацита, рутила и платиноидов [30-32].

Для установления генетической и породной принадлежности зерен акцессорных цирконов из изучаемых титаноносных месторождений Тимана полезно использовать опыт зарубежных исследователей. Примеры аномальных по составу цирконов из различных по составу и возрасту пород объединяет воздействие флюидов, обогащенных несовместимыми элементами (HFSE и REE), обычно немобильными при магматических и метаморфических процессах [38]. В цирконах из метаосадков Далрадианского комплекса в Шотландии было выявлено высокое содержание Y (до 5 мас.%  $Y_2O_3$ ), которое образовалось при интенсивной флюидной переработке пород [39]. Соотношение Th/U, близкое к 0,1-0,3 для цирконов с секториальной зональностью и ядер цирконов, соответствует диапазону величин Th/U отношения у метаморфических цирконов [40]. Гранулитовые цирконы выделяются среди других популяций своей окраской: в основном это зерна бесцветные или светло-розовые с «алмазным» блеском; для них характерна [41, 42] изометричная или округлая форма зерен циркона, напоминающая футбольный мяч. Высокая степень фракционирования LREE для популяции темных в CL-изображении цирконов [43], зоны изменения в них и часть ядер на дискриминантных диаграммах Ca – U,  $Sm_N/La_N$  – La и других попадают в поле гидротермальных цирконов и в область пористых цирконов, образованных в результате интенсивной флюидной переработки.

Предварительные результаты датирования циркона U-Pb методом (SHRIMP-II, ЦИИ ВСЕГЕИ) из сланцев рифейского фундамента под Пижемским месторождением дают интервал значений возраста 1,1-2,2 млрд лет с двумя четкими максимумами – 1100-1200 и 1450-1550 млн лет, – которые близки таким же пикам для циркона описываемых объектов. По данным других исследователей Северного [44], Среднего [28] и Южного Тимана [45], в породах фундамента отсутствует циркон возрастом моложе 1000-1100 млн лет. Эти данные принципиально отличаются от результатов изучения циркона из рудопроявления Ичетью и Пижемского месторождения, где присутствует значительная доля зерен более молодого возраста (570-1000 млн лет), которые не могли быть принесены из соседних провинций.

По всем признакам подстилающие рифейские глинистые сланцы лунвожской свиты не могли быть коренным источником циркона и титана для формирования гигантского Пижемского циркон-титанового месторождения. Данные, полученные по циркону из Пижемского месторождения и проявления Ичетью, а именно молодые устойчиво повторяющиеся датировки с возрастом около 600 млн лет и особенности редкоэлементного состава этого циркона, а также определенный по рутилу и монациту возраст единого события, выявляют временной рубеж гидротермального преобразования этих минералов – около 600 млн лет [29]. Этот возраст можно рассматривать как время интенсивных гидротермальных преобразований пород коренных источников, обусловившие формирование Пижемского месторождения и проявления Ичетью. Можно предположить, что был единый локальный коренной источник минералов титановой (Mg, Mn, V, Nb, Cr-ильменит-Fe-рутил-псевдорутил-лейкоксен), цирконовой и редкоземельной ассоциаций для двух объектов Пижемского месторождения и рудопроявления Ичетью.

Титановая ассоциация минералов в конглобратии Ичетью происходит либо из малоручейской (PR<sub>3</sub>mg) титаноносной толщи Пижемского месторождения, либо из подобного коренного источника. Ареал сбора минералов, присутствующих в них, возможно, несколько отличается. Судя по возрасту циркона из проявления Ичетью (наличие зерен архейского возраста) можно предположить, что источник части минералов (алмазов, циркона и др.) более глубинный.

На сопредельной территории Среднего Тимана на поверхности отсутствуют видимые минеральные проявления, разрушение которых и перемещение в сторону проявления Ичетью и Пижемского месторождения могло способствовать образованию наблюдаемых промышленных концентраций. Остается предположить только глубинный источник поступления рудного вещества для рассматриваемых объектов. Множество минералов по типоморфным особенностям близки



к породообразующим и аксессуарным минералам лампрофиров [3, 16], поэтому есть предположение, что одним из коренных источников обоих объектов были именно лампрофиры, которые в гряде Четласский Камень образуют крупные дайковые поля площадью в несколько десятков квадратных километров [16, 34]. Вероятно, что в глубине под Пижемским месторождением находятся подобные крупные дайковые поля лампрофиров, и они могли быть коренным источником этих объектов. Самые известные и изученные в Четласском Камне – Косьюское, Бобровское и Октябрьское дайковые поля лампрофиров. По Rb-Sr изотопным данным многочисленная совокупность проб лампрофиров образует изохрону с неопротерозойским возрастом  $819 \pm 19$  млн лет [34]. Также есть лампрофировые дайки возрастом около  $606 \pm 10$  млн лет, одновозрастные с четласскими карбонатитами. Наиболее вероятным источником рудного вещества, кроме высокотитанистых четласских лампрофиров (спессартитов и комптонитов), могут быть и щелочные базальты Вольско-Вымской гряды [16]. Возраст рудных минералов (торита, монацита и тантало-ниобатов) из Новобобровского комплексного редкометалльно-торий-редкоземельного месторождения на Среднем Тимане был определен Sm-Nd-методом –  $581 \pm 47$  млн лет [46]. Это свидетельствует о длительном периоде генерации лампрофировой магмы на Среднем Тимане, охватывающем период около 200 млн лет [16, 34]. Но это не единственный возможный источник рудных минералов рассматриваемых месторождений. Источником монацита, циркона, колумбита, рутила и прочих минералов могли быть и другие, эшелонированные на разной глубине, мелкие проявления таких полезных ископаемых.

Сложным вопросом является механизм вертикального переноса значительных масс вещества. Есть предположение, что лампрофиры под воздействием агрессивных флюидов могли разрушаться, образуя дезинтегрированные породы (коры выветривания на глубине). При этом биотит из лампрофиров мог превращаться в каолинит и гидромусковит-иллит, а ильменит – в лейкоксен, сидерит и гематит. Это и есть главные породообразующие и рудные минералы в составе пород Пижемского месторождения. Движущим фактором перемещения минерального вещества вверх были метаморфические флюиды (вода и уголекислота), тепловую энергию давали внедряющиеся рифейские магмы или разные фазы самих лампрофиров. Можно предположить две фазы магматической активности – рифейскую (700-600 млн лет) и позднедевонскую (370-360 млн лет). Первая привела к образованию Пижемского месторождения, вторая обусловила отделение рудного вещества для образования проявления Ичетью и его перемещение вверх по разрезу. Вторая фаза внедрения использовала уже сложившуюся проницаемую зону разломов. О высокой активности уголекислоты в предполагаемом процессе свидетельствуют огромные массы сидерита в Пижемском месторождении и насыщенные кальцитом вышележащие позднедевонские базальтовые туфы (D<sub>3v1</sub>) валсовской свиты.

**Заключение.** Уникальные по запасам титановые месторождения Тимана – Ярегское и Пижемское – относятся к одному генетическому типу метаморфогенных коренных лейкоксен-кварцевых месторождений. Пижемское относится к особому подтипу – псевдорутил-лейкоксен-кварцевому.

Первичным минералом обоих месторождений является ильменит. Лейкоксен как конечная фаза изменения ильменита образуется в результате многостадийного химического гидротермального процесса с участием уголекислотного флюида. Железо выносится из первичного минерала (ильменит → Fe-рутил → псевдорутил → лейкоксен + рутил) в виде бикарбоната, который преобразуется в сидерит и вместе с каолинитом, гидромусковитом и гематитом образует крепкий цемент рудных титаноносных песчаников.

Ярегское и Пижемское месторождения не могут считаться россыпями, поскольку не отвечают необходимым признакам: полезное ископаемое – титановые фазы не переносились в водных потоках (они хрупкие) и образовались на месте, так же как и главный породообразующий минерал песчаников – кластогенный неокатанный кварц (абразивный материал). Вторичный гидротермальный сидерит образует крепкую связку (цемент) между всеми минералами, поэтому рудные песчаники не отвечают второму признаку россыпей – полезные компоненты не находятся в рыхлой породе в виде свободных зерен (для их извлечения из агрегатов потребуются дополнительные технологические приемы).



Рифейские глинистые сланцы не могут быть коренным источником титана двух месторождений Тимана, так как по ним не образуются мощные классические, зональные химические коры выветривания, достаточные для накопления запасов. А у акцессорного ильменита в рифейских сланцах («чистый» от обычных для него типоморфных примесей) другой химический облик, в отличие от реликтового ильменита (богат Mg, Mn, V, Nb, Cr) в обоих месторождениях. Анатазовый лейкоксен, который развивается по сланцевому ильмениту, минимально распространен в титаносносных песчаниках коренных месторождений, где преобладает рутиловый лейкоксен.

Больше всего в качестве коренного источника вещества этих месторождений по спектру акцессорных минералов могут подходить магматические основные и щелочно-ультраосновные породы. Одним из источников вещества титановых месторождений могли быть коры выветривания по дайковым полям лампрофиров, подобных четласким.

Гидротермальное преобразование акцессорных минералов – геохронометров (циркона, рутила и монацита) и (Mg, Mn, V, Cr, Nb)-ильменита из проявления Ичетью и Пижемского месторождения – произошло около 600 млн лет назад. Изотопно-геохимическое исследование циркона из проявления Ичетью и Пижемского месторождения позволяет сформулировать важный вывод: циркон из рудопоявления Ичетью подобен циркону из Пижемского месторождения по повышенному содержанию неформальных элементов (Y, REE, P, Nb, Ti и Ca) и наличию значений U-Pb возраста около 600 млн лет. Полученные изотопно-геохимические данные по акцессорным минералам не противоречат модели, предполагающей интенсивное протекание гидротермально-флюидизационных процессов при образовании рудопоявления Ичетью и Пижемского месторождения.

Данное исследование не ставит точку в дискуссии о генезисе титановых месторождений Среднего Тимана. В каждой из рассмотренных гипотез есть свое рациональное зерно, но имеются и серьезные противоречия. Разработка достоверной модели образования титановых месторождений Среднего Тимана требует дополнительных геолого-минералогических исследований, в частности, изучения акцессорных и рудных минералов современными изотопно-геохимическими и другими методами.

*Авторы выражают благодарность канд. геол.-минерал. наук С.Е.Борисовскому, О.Л.Галанкиной и другим коллегам за помощь в аналитических исследованиях.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Макеев А.Б. Пижемское титановое месторождение – новый объект ближайшего освоения в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 4. С. 541-556. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-541-556
2. Калюжный В.А. Геология новых россыпеобразующих метаморфических формаций. М.: Наука, 1982. 264 с.
3. Макеев А.Б. Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения // Минералогия. 2016. № 1. С. 24-49.
4. Anisonyan K.G., Sadykhov G.B., Olyunina T.V. et al. Magnetizing roasting of leucoxene concentrate // Russian metallurgy (Metally). 2011. Vol. 2011. Iss. 7. P. 656-659. DOI: 10.1134/S0036029511070020
5. Zablotskaya Y.V., Sadykhov G.B., Goncharenko T.V. et al. Pressure Leaching of Leucoxene Concentrate Using Ca(OH)<sub>2</sub> // Russian Metallurgy (Metally). 2011. Vol. 2011. Iss. 11. P. 1030-1034. DOI: 10.1134/S0036029511110115
6. Садыхов Г.Б., Макеев А.Б., Копьев Д.Ю. и др. Минералого-технологические особенности титаносносных песчаников Пижемского месторождения // Металлы. 2021. № 5. С. 117-129. DOI: 10.1134/S003602952109014
7. Калюжный В.А. Некоторые особенности ильменитосносных фаций зеленых сланцев и метаморфизма минералов титана на примере Тиманского кряжа // Авторефераты работ сотрудников ИГЕМ за 1963. М.: Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии, 1964. С. 92-98.
8. Калюжный В.А. Некоторые новые данные о титаносносности пород метаморфических фаций Тимана и связанных с ними россыпей // Геология россыпей. М.: Наука, 1965. С. 241-243.
9. Калюжный В.А. О распространении и устойчивости ильменита в корях выветривания // Геология рудных месторождений. 1968. Т. 10. № 5. С. 63-76.
10. Игнатьев В.Д., Бурцев И.Н. Лейкоксен Тимана: Минералогия и проблемы технологии. СПб: Наука, 1997. 215 с.
11. Кочетков О.С. Акцессорные минералы в древних толщах Тимана и Канина. Л.: Наука, 1967. 120 с.
12. Плякин А.М., Еришова О.В. О возрасте девонских полиминеральных россыпей Тимана // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2010. № 1. С. 60-63.
13. Цаплин А.Е., Тополюк В.В., Бакулина Л.П., Довжикова Е.Г. Строение титаносносной малоручейской свиты Среднего Тимана // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1988. № 9. С. 57-62.



14. Швецова И.В. Минералогия лейкоксена Ярегского месторождения. Л.: Наука, 1975. 127 с.
15. Макеев А.Б., Дудар В.А. Минералогия алмазов Тимана. СПб: Наука, 2001. 336 с.
16. Макеев А.Б., Лебедев В.А., Брянчанинова Н.И. Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург: Изд-во Уральского отделения РАН, 2008. 312 с.
17. Плякин А.М., Еришова О.В. Минералогия и генезис девонских полиминеральных россыпей Тимана // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139. № 3. С. 108-114.
18. Смирнов В.И. Плутонизм и непутизм в развитии учения о рудных месторождениях. М.: Наука, 1987. 94 с.
19. Корчуганова Н.И., Сурков А.В. Генетические типы россыпей. М.: ВНИИгеосистем, 2010. 146 с.
20. Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г. Глинистые сланцы лунновской свиты Вольско-Вымской гряды (Средний Тиман): состав, возраст, акцессорный циркон // Материалы Минералогического семинара с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2018)», 22-24 мая 2018, Сыктывкар, Россия. Геопринт, 2018. С. 40-41.
21. Кремс А.Я., Вассерман Б.Я., Матвиевская Н.Д. Условия формирования и закономерности размещения залежей нефти и газа. М.: Недра, 1974. 334 с.
22. Макеев А.Б., Борисовский С.Е., Красоткина А.О. Химический состав и возраст монацита и куларита из титановых руд Пижемского и Ярегского месторождений (Средний и Южный Тиман) // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 1. С. 22-31. DOI: 10.18599/grs.2020.1.22-31
23. Чернышев И.В., Макеев А.Б., Гольцман Ю.В., Брянчанинова Н.И. Возраст титановых месторождений Северо-Востока Восточно-Европейской платформы: Rb-Sr-данные // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435. № 3. С. 378-383.
24. Белая Е.А., Виктор В.В., Жеребцов Д.А., Колмогорцев А.М. Влияние оксидов d-элементов на фазовое превращение анатаз-рутил // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Химия». 2018. Т. 10. № 1. С. 5-16. DOI: 10.14529/chem180101
25. Колокольцев В.Г., Лисицына М.А. О гидротермально-метасоматическом генезисе лейкоксеновых руд Ярегского месторождения (Южный Тиман) // Вулканогенно-осадочное рудообразование. 1992. С. 89-91.
26. Колокольцев В.Г. Блочные метасоматиты в осадочных толщах и их диагностика. СПб: ВСЕГЕИ, 1999. 92 с.
27. Тигунов Л.П., Быховский Л.З., Зубков Л.Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения. Минеральное сырье: серия геолого-экономическая. М.: ВИМС, 2005. № 17. 104 с.
28. Брусницына Е.А., Еришова В.Б., Худолей А.К., Андерсен Т. Результаты исследований U-Pb-изотопного возраста обломочных цирконов из средне-верхнерифейских отложений Четласского Камня (Тиманской гряды) // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. 2018. Т. 2. С. 384-387.
29. Скублов С.Г., Красоткина А.О., Макеев А.Б. и др. Геохимия редких элементов (LA-ICP-MS) в монаците из рудопроявления Ичетью, Средний Тиман // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 338-341. DOI: 10.31241/FNS.2018.15.084
30. Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г. Новые данные об U-Pb-возрасте и составе циркона (SHRIMP-II, SIMS) из полиминерального рудопроявления Ичетью (Средний Тиман) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 11. С. 28-42. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-11-28-42
31. Макеев А.Б., Красоткина А.О., Скублов С.Г. Геохимия и U-Pb-возраст циркона Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 5. С. 38-52. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-5-38-52
32. Скублов С.Г., Красоткина А.О., Макеев А.Б. и др. Первые данные о возрасте (U-Pb-метод, TIMS, LA-ICP-MS) рутила из полиминерального рудопроявления Ичетью, Средний Тиман // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 357-363. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.357
33. Макеев А.Б., Макеев Б.А. Цинковые хромшпинелиды Среднего Тимана и Приполярного Урала // Доклады РАН. 2005. Т. 404. № 2. С. 235-240.
34. Макеев А.Б., Андреичев В.Л., Брянчанинова Н.И. Rb-Sr возраст лампрофиров Среднего Тимана // Доклады РАН. 2009. Т. 426. № 1. С. 94-97.
35. Макеев А.Б., Борисовский С.Е. Типоморфизм и источники титановых и ниобиевых минералов проявления Ичетью, Средний Тиман // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2013. № 2. С. 30-37.
36. Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2006. Vol. 151. P. 413-433. DOI: 10.1007/s00410-006-0068-5
37. Макеев А.Б., Иванух В., Обыден С.К. и др. Взаимоотношение алмаза и карбонадо (по материалам исследования бразильской и среднетиманской коллекций) // Доклады РАН. 2003. Т. 393. № 3. С. 393-397.
38. Shao-Yong Jiang, Ru-Cheng Wang Xi, Sheng Xu, Kui-Dong Zhao. Mobility of high field strength elements (HFSE) in magmatic-, metamorphic-, and submarine-hydrothermal systems // Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C. 2005. Vol. 30. Iss. 17-18. P. 1020-1029. DOI: 10.1016/j.pce.2004.11.004
39. Hay D.C., Dempster T.J. Zircon behaviour during low-temperature metamorphism // Journal of Petrology. 2009. Vol. 50. Iss. 4. P. 571-589. DOI: 10.1093/petrology/egp011
40. Yakymchuk C., Kirkland C.L., Clark C. Th/U ratios in metamorphic zircon // Journal of Metamorphic Geology. 2018. Vol. 36. Iss. 6. P. 715-737. DOI: 10.1111/jmg.12307
41. Corfu F., Hancher J.M., Hoskin P.W., Kinny P. Atlas of zircon textures // Reviews in mineralogy and geochemistry. 2003. Vol. 53. Iss. 1. P. 469-500. DOI: 10.2113/0530469
42. Bhowmik S.K., Wilde S.A., Bhandari A., Basu Sarbadhikari A. Zoned monazite and zircon as monitors for the thermal history of granulite terranes: an example from the Central Indian Tectonic Zone // Journal of Petrology. 2014. Vol. 55. Iss. 3. P. 585-621. DOI: 10.1093/petrology/egt078
43. Hoskin P.W. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69. Iss. 3. P. 637-648. DOI: 10.1016/j.gca.2004.07.006



44. *Андреичев В.Л., Соболева А.А., Герелс Дж.* U-Pb возраст и источники сноса обломочных цирконов из верхнедокембрийских отложений Северного Тимана // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2014. Т. 22. № 2. С. 32-45.

45. *Кузнецов Н.Б., Натапов Л.М., Белоусова Е.А. и др.* Первые результаты U-Pb-датирования и изотопно-геохимического изучения детритовых цирконов из позднедокембрийских песчаников Южного Тимана (увал Джежим-Парма) // Доклады РАН. 2010. Т. 435. № 6. С. 798-805.

46. *Удорткина О.В., Капитанова В.А.* Геохронология пород субстрата и руд редкометалльно-редкоземельных месторождений и рудопроявлений на севере Урала и Тимане // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2016. № 4(28). С. 85-100.

**Авторы:** **А.Б.Макеев**, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, [abmakeev@mail.ru](mailto:abmakeev@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8815-0959> (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия), **Н.И.Брянчанинова**, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7052-5222> (Геологический институт РАН, Москва, Россия), **А.О.Красоткина**, канд. геол.-минерал. наук, руководитель проекта, <https://orcid.org/0000-0003-1687-8494> (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*