

УДК 553.494.068.5(470.11)

В. Г. Колокольцев, С. А. Сергеев (Институт Карпинского)

ЧУПЛЕГСКОЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЕ ТИТАНОНОСНЫХ РОССЫПЕЙ НА СЕВЕРЕ РУССКОЙ ПЛИТЫ (АРХАНГЕЛЬСКОЕ СВОДОВОЕ ПОДНЯТИЕ)

На севере Восточно-Европейской платформы россыпные месторождения титановых минералов известны только в пределах Тиманских складчато-глыбовых поднятий, разделяющих Печорскую и Русскую плиты. Единственное на севере Русской плиты Чуплегское рудопроявление титаноносных россыпей обнаружено в керне скважины, пробуренной в 80 км восточнее г. Архангельск в контуре одноименного сводового поднятия. Титаноносные песчаники в верхневендской терригенной толще, вскрытые на глубине 171,4–71,5 м, содержат ильменит и продукты его трансформации: лейкоксен, рутил, анатаз, брукит. Концентрации TiO_2 в них варьируют от 1,32 до 6,1%. В статье приведены геологические, литологические, минералого-геохимические характеристики рудопроявления и впервые полученные результаты изотопного U-Pb исследования детритовых цирконов. Возрастные датировки циркона из Чуплегской россыпи очень сходны с датировками циркона из тиманских (гигантской Ярегской нефте-лейкоксеновой и крупной Пижемской ильменит-лейкоксеновой) залежей.

Чуплегское рудопроявление является прямым признаком наличия промышленных титаносодержащих россыпей в недрах северной части Русской плиты. Они могут залегать на глубинах (до 200 м), доступных для открытой обработки.

Ключевые слова: венд, рудопроявление, ильменит, прямые признаки россыпей, Ярегское месторождение, Пижемское месторождение, U-Pb исследования цирконов.

V. G. Kolokol'tsev, S. A. Sergeev (*Karpinsky Institute*)

CHUPLEGA ORE OCCURRENCE OF TITANIUM PLACERS IN THE NORTH OF THE RUSSIAN PLATE (ARKHANGELSK ARCHED UPLIFT)

In the north of the East European Platform, placer deposits of titanium minerals are known only within the Timan fold-block uplifts separating the Pechora and Russian plates. The only occurrence of titanium-bearing placers in the north of the Russian Plate, the Chuplega ore occurrence, was discovered in the core of a borehole drilled 80 km east of the city of Arkhangelsk in the contour of the cognominal arched uplift. Titanium-bearing sandstones in the Upper Vendian terrigenous sequence, penetrated at a depth of 171.4–71.5 m, contain ilmenite and its transformation products: leucoxene, rutile, anatase, brookite. TiO_2 concentrations in them vary from 1.32 to 6.1%. The article presents the geological, lithological, mineralogical, and geochemical characteristics of the ore occurrence and the results of the U-Pb isotope study of detrital zircons obtained for the first time. The datings of zircon from the Chuplega placer are very similar to those from the Timan deposits (giant Yarega oil-leucoxene and large Pizhma ilmenite-leucoxene).

The Chuplega ore occurrence is a direct indication of the presence of commercial titanium-bearing placers in the depths of the northern part of the Russian Plate. They can occur at depths (to 200 m) accessible for open-pit mining.

Keywords: Vendian, ore occurrence, ilmenite, direct signs of placers, Yarega deposit, Pizhma deposit, U-Pb zircon studies.

Для цитирования: Колокольцев В. Г., Сергеев С. А. Чуплегское рудопроявление титаноносных россыпей на севере Русской плиты (Архангельское сводовое поднятие) // Региональная геология и металлогения. – 2024. – № 97. – С. 27–40.

Введение. Чуплегское рудопроявление было обнаружено в 1986 г. при выполнении программы по оценке Севера Европейской России на комплекс гипергенных месторождений полезных ископаемых [14]. Ко времени реализации программы на севере Восточно-Европейской платформы россыпи титановых минералов были известны лишь в пределах Тиманских складчато-глыбовых поднятий, разделяющих Печорскую и Русскую

плиты, на территории которых прямые признаки россыпного титана отсутствовали. На Тимане титаноносные россыпи и их проявления являются частью вендских, эйфельских, живетских, франских и фаменских отложений [5; 7; 8; 11] и контролируются крупными положительными тектоническими структурами [6; 14]. Еще отчетливее проявлена их пространственная связь с горстами меньших порядков, которыми осложняются

эти структуры: так на Южном Тимане уникальная Ярегская нефтетитановая залежь размещена в своде Ухтинского вала, имеющего горстовую природу, здесь же малоизученная Водненская залежь локализована в слабо выраженной нефтесодержащей антиклинальной складке; на Среднем Тимане крупная Пижемская ильменит-лейкоксовая россыпь приурочена к осевой зоне Вымского горста, а на Северном Тимане Волонгское титановое проявление тяготеет к крылу Волонгской флексуры. Подобную когерентность обнаруживают и локальные проявления титановых россыпей, вскрытые одиночными скважинами: к примеру, Чиньяворыкское проявление россыпей [5] в юго-западном крыле южной части Вольского горста, а также целый ряд недавно обнаруженных в керне старых скважин [7] россыпных проявлений в крыльях Ухтинского вала и др.

Для успешного выполнения вышеупомянутого задания следовало доказать, что установленная на Тиманской антеклизе закономерность имеет не локальный, а региональный характер, то есть аналогичной закономерности подчиняются россыпи и в других районах Восточно-Европейской платформы. По нашему мнению, для решения такой задачи на севере Русской плиты удачным полигоном является область Архангельского сводового поднятия в юго-западной части Беломорско-Кулойского региона. Архангельский свод осложнен второстепенным горстом (рис. 1) и напоминает тиманские россыпеконтролирующие тектонические

структуры. К тому же эта территория разбурена скважинами, вскрывшими палеозойский чехол и подстилающие вендские породы на сотни метров в положительных и отрицательных тектонических структурах. Причиной отсутствия на севере Русской плиты признаков титановых россыпей даже в скважине, пробуренной в контуре, как казалось, наиболее перспективного локального горста (см. рис. 1), могла быть недостаточная изученность наземной части Архангельского Беломорья в сравнении с акваторией, в контуре которой морские геологи обнаружили высокие концентрации (до 106,9 кг/м³) ильменита в донных осадках Кандалакшского залива [9; 17]. Поэтому мы предположили, что показателем потенциальной рудоносности может служить не только повышенное содержание TiO₂ в породе, но и аномально высокий уровень концентрации титановых минералов в составе тяжелой фракции породы. Другими словами, если в Архангельском своде, в контуре, как казалось, наиболее благоприятном для формирования россыпей локального горста в вендских песчаниках, отмечаются только фоновые концентрации диоксида титана, однако выделенная из них тяжелая фракция более чем на 50% сложена титановыми минералами, то это может служить подтверждением вероятной эффективности тиманского тектонического критерия на Русской плите и целесообразности его использования в поисковых целях. Эта гипотеза поддавалась проверке керном скв. 226. Она пробурена почти в центре безымянного гор-

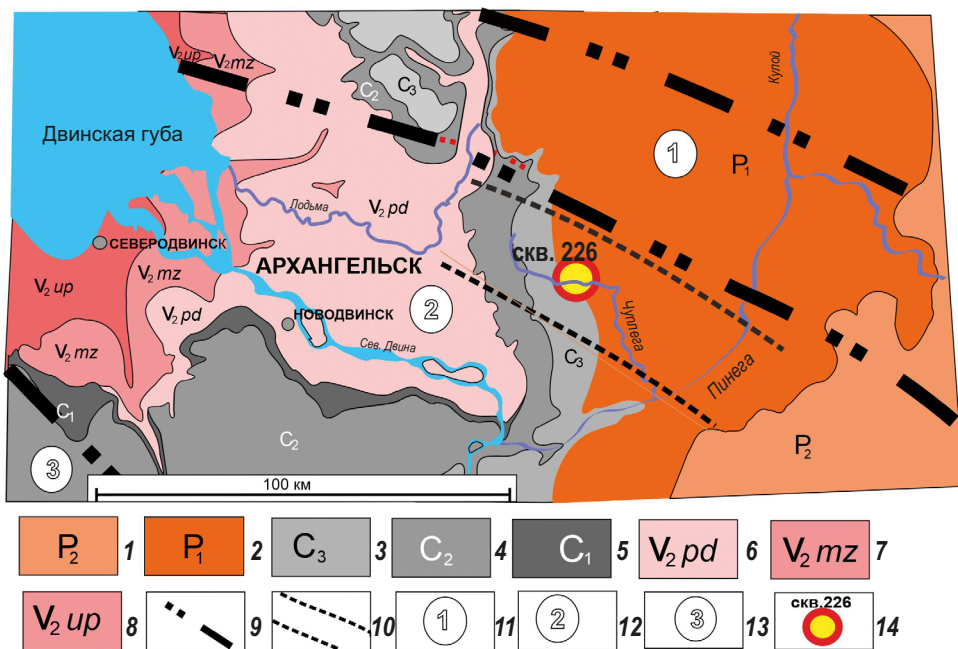


Рис. 1. Местоположение Чуплегского рудопроявления [1; 3; 4]

1, 2 – пермская система, отделы: 1 – верхний, 2 – нижний; 3–5 – каменноугольная система, отделы: 3 – верхний, 4 – средний, 5 – нижний; 6–8 – верхневендские свиты: 6 – падунская, 7 – мезенская, 8 – усть-пинежская; 9–13 – тектонические структуры: 9 – крупные глубинные разломы, 10 – Чуплегский горст по [14] или Архангельский выступ по [3; 4], 11 – Керецко-Лешуконский грабен, 12 – Архангельское сводовое поднятие, 13 – Кандалакшко-Двинский грабен; 14 – Чуплегское рудопроявление

ста [1], названного нами Чуплегским [14], а также известного как Архангельский горст [4] или Архангельский выступ [3].

В итоге нашей работы были получены следующие результаты.

В тяжелой фракции вендских песчаников из керна скв. 226 титановые минералы оказались доминирующими (до 80–97% от веса всей фракции), но самыми важными оказались результаты исследования песчаников, в которых местные геологи отметили заметные концентрации «черных рудных минералов», каковые являются, как мы установили [14], ильменитом и продуктами его трансформации. В двух штучных пробах этих песчаников определены концентрации TiO_2 , соответствующие промышленным рудам (4,36 и 6,1%, что эквивалентно 89,8 и 125,6 кг/м³), и которые, как нам казалось, невозможно не заметить при первичной документации керна. Так, в 1986 г. [14; 16] коллективом полевой партии ВСЕГЕИ было случайно(?) обнаружено первое и пока что единственное на севере Русской плиты рудопроявление титаносных россыпей.

Материалы о геологическом строении и минералогических особенностях этого титан-циркониевого проявления, если не считать тезисной информации [16] и краткого упоминания [14, с. 20], не опубликованы. Поэтому данная работа направлена на восполнение этого пробела. Ее целью является геологическая характеристика обнаруженного проявления россыпного титана, названного нами Чуплегским (по р. Чуплега, в бассейне которой оно находится), и обсуждение впервые полученных результатов изотопного U-Pb исследования детритовых цирконов, которые могут быть полезными для определения источника титановых минералов, возраста россыпной титановой минерализации и, возможно, полезны для оценки потенциальной промышленной значимости обнаруженного объекта.

Геологическая позиция Чуплегского титанового рудопроявления. Рудопроявлением мы называем природное скопление минерального вещества, соответствующее промышленным рудам, которое пока не является признанным месторождением, но при дальнейшем изучении может перейти в эту категорию.

Обсуждаемое титановое рудопроявление, вскрытое скв. 226, находится в 80 км к востоку от г. Архангельск в бассейне р. Чуплега (правый приток р. Пинега, впадающей в Сев. Двину) (см. рис. 1). В тектоническом плане эта территория является Архангельским сводовым поднятием, которое на юго-западе ограничено Кандалакшско-Двинским, а с северо-востока Керецко-Лешуконским грабенами. Рудопроявление приурочено к терригенным образованиям верхнего венда, который залегает почти горизонтально (угол падения измеряется долями градуса) на глубокометаморфизованных породах нижнедокембрийского кристаллического фундамента либо на красноцветных терригенных породах рифея (в грабенах).

Отложения вендского комплекса мощностью около 1000 м соответствуют нормальному осадочному циклу, трансгрессивная часть которого отвечает усть-пинежской свите, а регрессивная представлена мезенской и падунской свитами [3]. Усть-пинежская свита мощностью 100–300 м сложена преимущественно коричневыми глинами с редкими прослоями песчаников и алевролитов. Характерны тонкие прослои пелитовых туфов и туффитов монтмориллонитового состава. Перекрывается она мезенской свитой, представленной красно-коричневыми и зеленовато-серыми песчаниками, грубо переслаивающимися с алевролитами. По составу они кварцевые и олигомиктовые (кварца 75–95%), с полевыми шпатами (5–20%). Их тяжелая фракция характеризуется заметными количествами циркона, турмалина, титанистых и других рудных минералов [4]. На мезенской свите (мощностью от 300 до 600 м) залегает падунская свита мощностью от первых до 300 м. Представлена она переслаиванием песчаников, алевролитов и глин. Мощность песчаных слоев обычно 2–3 м, в редких случаях – 9 м. Мощности пластов алевролитов и глин примерно на порядок меньше. Цвет пород преимущественно кирпично-красный и светло-серый. Песчаники мелко- и среднезернистые, грубослоистые и массивные, по составу кварцевые, реже олигомиктовые. Тип цемента пленочный, реже поровый, в основном глинисто-железистый, иногда – карбонатный и гипсовый. Как и в мезенской свите, тяжелая фракция песчаников нередко содержит заметные количества титановых и других рудных минералов, а также циркон, реже турмалин. Из пород всех трех свит выделены характерные для венда микрофитосиллии [3].

На вендских отложениях со стратиграфическим несогласием залегает каменноугольная доломит-известняковая толща с песчано-глинистой пачкой в основании. На ингрессивное (прислоненное) ее залегание указывает скользящий возраст подошвы, изменяющийся от визейского века раннего карбона (в палеоложинах) до московского века среднего карбона (на склонах). Нижнекаменноугольная телзинская свита на исследуемой площади распространена ограниченно, сложена пестроцветными песчаниками, алевролитами с прослоями кремнисто-известковых палеопочвенных горизонтов. Песчаники кварцевые, реже полевошпат-кварцевые. Предполагаемая мощность свиты на этой территории не превышает 20–30 м [4]. Ее поздневизейско-раннесерпуховский возраст установлен на основании определения спорных комплексов [4].

Из залегающих непосредственно на вендском основании других отложений каменноугольной системы отметим урзугскую и воереченскую объединенные свиты московского яруса. Суммарная мощность этих двух свит на исследуемой местности составляет от первых до десятков метров. В нижней части преобладают песчаники светло-серые, зеленовато-серые, коричневатокрасные. В объяснительной записке указывается,

что «в минеральном составе тяжелой фракции отложений воереченской свиты основную роль играют рудные минералы (15–50%), титанистые минералы составляют 15–20%, циркон 2–3%, турмалин до 11%, отмечается ставролит 0,2–0,7%, спорадически встречаются гранат, эпидот, дистен» [4, с. 49].

Скв. 226 на глубине 171,4–71,5 м вскрыта толща переслаивания мелко-среднезернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов преимущественно красно-коричневого цвета внизу и светло-серых в кровле. Эта толща, вмещающая Чуплегское рудопроявление, по своим структурно-текстурным особенностям может быть отнесена к падунской свите, в составе которой преобладают красноцветы, но присутствуют и светло-серые песчаники. Следует отметить, что в более южных районах Беломорья светло-серые песчаники наблюдаются в основании карбона, но по своим литологическим признакам они существенно отличаются от песчаников чуплегской скважины. В скв. 226 на светло-серых породах падунской свиты залегают светло-серые слабоглинистые известняки (31,4 м) среднекаменноугольного возраста, с пачкой зеленовато-серых глинисто-песчаных пород (1,5 м) в основании. Известняки, в свою очередь, перекрываются четвертичными осадками мощностью 38,6 м.

Литологическая и минералого-геохимическая характеристика рудопроявления (приведенные в этом разделе аналитические данные получены в ХАЛ Института Карпинского). Вскрытую скважиной в интервале глубин 171,4–71,5 м терригенную толщу можно разделить по цвету на три части: нижнюю – красноцветную (171,4–100,1 м), среднюю (переходную по цвету) – пестроцветную (100,1–93,0 м) и верхнюю – сероцветную (93,0–71,5 м). Пестроцветная пачка определяется появлением в красно-коричневых породах (с глу-

бины 100,1 м) пятен и соразмерных слоистости светло-серых и белых полос, сгущающихся вверх по разрезу, и сменяющаяся на глубине 93 м таким же набором пород, но исключительно светло-серого цвета с редкими реликтовыми красновато-розовыми пятнами.

Все три пачки сложены преимущественно песчаными породами, содержащими прослойки аргиллитов и алевролитов. При мощности глинистых разностей измеряется сантиметрами и дециметрами, редко – первыми метрами. Песчаники мелко- и среднезернистые сортированные, по большей части кварцевые горизонтально-, наклонно- и косослоистые, чаще слабо литофицированные, но изредка встречаются прослойки плотно сцементированных окварцованных (кварцитовидных) разностей с оксидами и гидроксидами железа. Кварцевые зерна алевролитовой размерности, как правило, более окатанные в сравнении с псаммитовыми полуокатанными и угловатыми. Кварц несет следы коррозии и регенерации, содержит много твердых и газо-жидких включений.

В гранулометрическом отношении красноцветы, пестроцветы и сероцветы очень близки, лишь в нижних песчаниках намечается увеличение доли фракции размером 0,1–0,01 мм при общем доминировании класса 0,25–0,1 мм. По минеральному составу серые и красно-коричневые песчаники несколько разнятся. Так, песчаники верхней пачки характеризуются ильменит-кварцевым составом, т. е. превалянием ильменита над лейкоксеном и значительно большим в сравнении с красными песчаниками содержаниями циркона, а также для них обычно отсутствие цемента, а в псаммитах нижней пачки развит пленочно-контактный глинисто-слюдисто-сидеритово-гематитовый цемент и усиливается общая сидеритизация толщи. Обогащение пород является, скорее всего, результатом поздних наложенных (эпигенетических) процессов

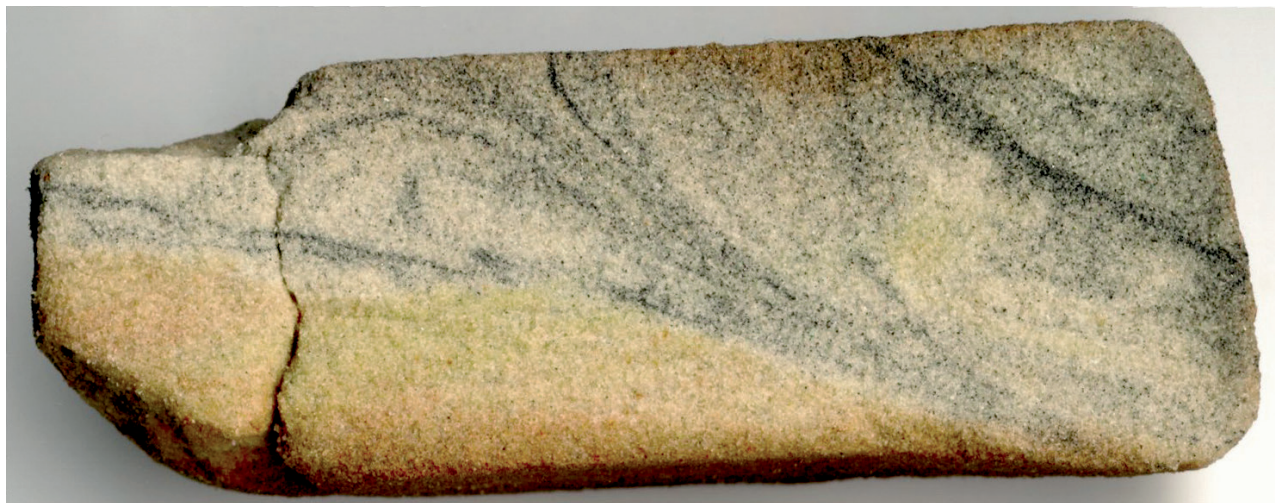


Рис. 2. Сложная косая слоистость в кварцевом ильменитсодержащем песчанике состава (вес. %)

SiO_2 – 90,3; Al_2O_3 – 0,73; TiO_2 – 6,10; Fe_2O_3 (общ.) – 2,48; MnO_2 – 0,18; MgO <0,1; CaO – 0,17; Na_2O <0,1; K_2O <0,01; P_2O_5 <0,05; ппп – 0,50; сумма – 100; V <0,005; Cr <0,002; Ba – 0,03. Сканограмма образца. Черное – ильменит, скв. 226, гл. 104,0 м

восстановления железа с последующим выносом его мобильной закиси. В обеленных песчаниках сложная косая слойчатость контрастно подчеркивается черным шлихом рудных минералов (рис. 2), а в красноцветной пачке она видна хуже. Проведенное исследование показало, что эти рудные минералы представлены исключительно ильменитом и продуктами его трансформации (лейкоксомом, рутилом, анатазом, брукитом) с незначительной примесью мелких зерен гематита, пирита, халькопирита (рис. 3, л–н). В кварцевых песчаниках всегда встречаются зерна циркона (0,1–0,05 мм) розовато-сиреневого цвета.

Выход тяжелой фракции песчаников составляет от 7,4% (в классе 0,25–0,1 мм) до 13,24% (0,1–0,01 мм). Состав тяжелой фракции (подсчитанный для всей толщи в классе 0,25–0,1 мм) преимущественно ильменитовый (до 97%), количество лейкоксена меняется от 2 до 70%, циркона 3–20%, рутила + анатаза 0–10%, гроссуляра 5–7%, кроме того, присутствуют турмалин, ставролит, пирит, сидерит, гематит. Отметим, что два последних минерала резко преобладают в подстилающей (глубже 171,4 м) толще, составляя до 90% тяжелой фракции.

Основной титансодержащий минерал – ильменит – образует послойные скопления, его зерна размерами от 0,05 до 0,15 мм, хорошоокатанные, имеют преимущественно вытянуто-округлую форму (рис. 3, а–е). Этот титанистый железняк в различной степени лейкоксенизирован. Наименее измененные зерна имеют следующий химический состав (вес. %): SiO_2 – 13,79; TiO_2 – 52,90; Al_2O_3 – 1,40; Fe_2O_3 – 10,96; FeO – 17,35; MnO – 2,40; MgO – 0,16; CaO – 0,23; Na_2O – 0,07; K_2O – 0,07; $\text{H}_2\text{O}+$ – нет; P_2O_5 < 0,1; Cr_2O_3 – 0,24; сумма – 99,57.

Высокое содержание двухвалентного железа подтверждает слабую лейкоксенизацию ильменита, а повышенное количество марганца свидетельствует о немалой роли в его составе пирофанитовой молекулы (MnTiO_3). Высокое для ильменита содержание кремния объясняется присутствием двух кремниевых фаз: собственно кремниевой (кварц) и сложной кремний-титановой, заслуживающей специального рассмотрения, выходящего за рамки поставленных перед нами задач. Эти фазы проявлены на снимках в рентгеновских лучах (рис. 4, в).

При рентгеноструктурном исследовании лейкоксенизированного ильменита (проведенном в ХАЛ Института Карпинского) на дифрактограммах кроме большого числа ильменитовых диагностических рефлексов (3,71, 2,75, 2,54, 2,22, 1,70, 1,50 Å) фиксируются линии брукита, анатаза и рутила. При невысокой степени лейкоксенизации минерала ведущей кристаллической модификацией двуокиси титана является брукит, а рефлексы рутила слабы и немногочисленны. По-видимому, начальная стадия лейкоксенизации титанистого железняка характеризуется появлением прежде всего брукита с подчиненным развитием анатаза и рутила. Дальнейшая лейкоксенизация ведет к замене брукита рутилом и анатазом. На рентгенограмме количество ильмени-

товых рефлексов резко сокращается, их интенсивность падает, а рефлексы рутила и анатаза, напротив, усиливаются с образованием в результате ильменит-анатаз-рутилового лейкоксена (рис. 5).

По морфологии и характеру соотношений ильменитовых зерен с перечисленными новообразованными полиморфными модификациями двуокиси титана можно выделить по меньшей мере два этапа генезиса последних. К примеру, из рис. 3, е–з следует, что выступающие на поверхности зерна лейкоксенизированного ильменита рутиловые и анатазовые микродрузы, скорее всего, возникли на постседиментационном этапе, а решетчатый рутил в округлом зерне (рис. 3, и) образовался в ильменитсодержащем субстрате прежде, чем его обломки поступили в бассейн россыпе-(осадко)накопления. Менее уверенно можно предположить сходный доседиментогенный этап формирования прозрачного рутила в обломках на рис. 3, и, к. Из сульфидных минералов в песчаниках обнаружены кристаллы и фрамбоздры пирита и халькопирит (рис. 3, л–н).

Объемный вес титаноносных песчаников в среднем составляет 2,06 г/см³. Концентрация диоксида титана в них колеблется от 1,32 до 6,1% (табл. 1). Содержание циркония варьирует от 100 до 3000 г/т и положительно коррелируется с содержанием иттрия (10–1000 г/т).

Выявленные промышленные концентрации диоксида титана в двух штуфных пробах и титановая специализация тяжелой фракции песчаников, залегающих в интервале глубин 71,5–171,4 м, позволяют эту почти 100-метровую вендскую толщу идентифицировать как потенциально продуктивную титаноносную формацию.

В песчаных породах титаноносной формации рентгеноспектральным анализом фиксируются высокие концентрации ниобия (290 г/т) и около-кларковые – урана (до 1 г/т), тория (1,8–4,5 г/т), свинца (около 1 г/т), стронция (27–79 г/т). Рубидий, обогащение которым характерно для отложений нижней части формации, связан, по-видимому, со слюдой. Согласно технологическим требованиям к титановому сырью, чуплегский ильменитовый концентрат содержит невысокие количества вредных примесей: P_2O_5 меньше нормы (до 0,25%) и чуть больше нормы Cr_2O_3 (около 0,1%), но относительно много MnO (до 0,5%).

По наблюдениям А. Ф. Станковского [18], в верхах венда среди аргиллитов-алевролитовых парагенезисов песчаники залегают в виде мощных линз протяженностью в несколько километров. В связи с этим и принимая во внимание, что высокие концентрации диоксида титана (125,6 кг/м³) в песчаниках обнаружены в случайно пробуренной скважине, можно предположить наличие на территории Архангельского Беломорья промышленно значимых титан-циркониевых залежей на глубинах (до 200 м), доступных для открытой разработки.

С целью оценки возраста формирования титан-циркониевого рудопроявления и установления вероятного источника рудных компонентов нами проведены изотопные U-Pb исследования детритового циркона.

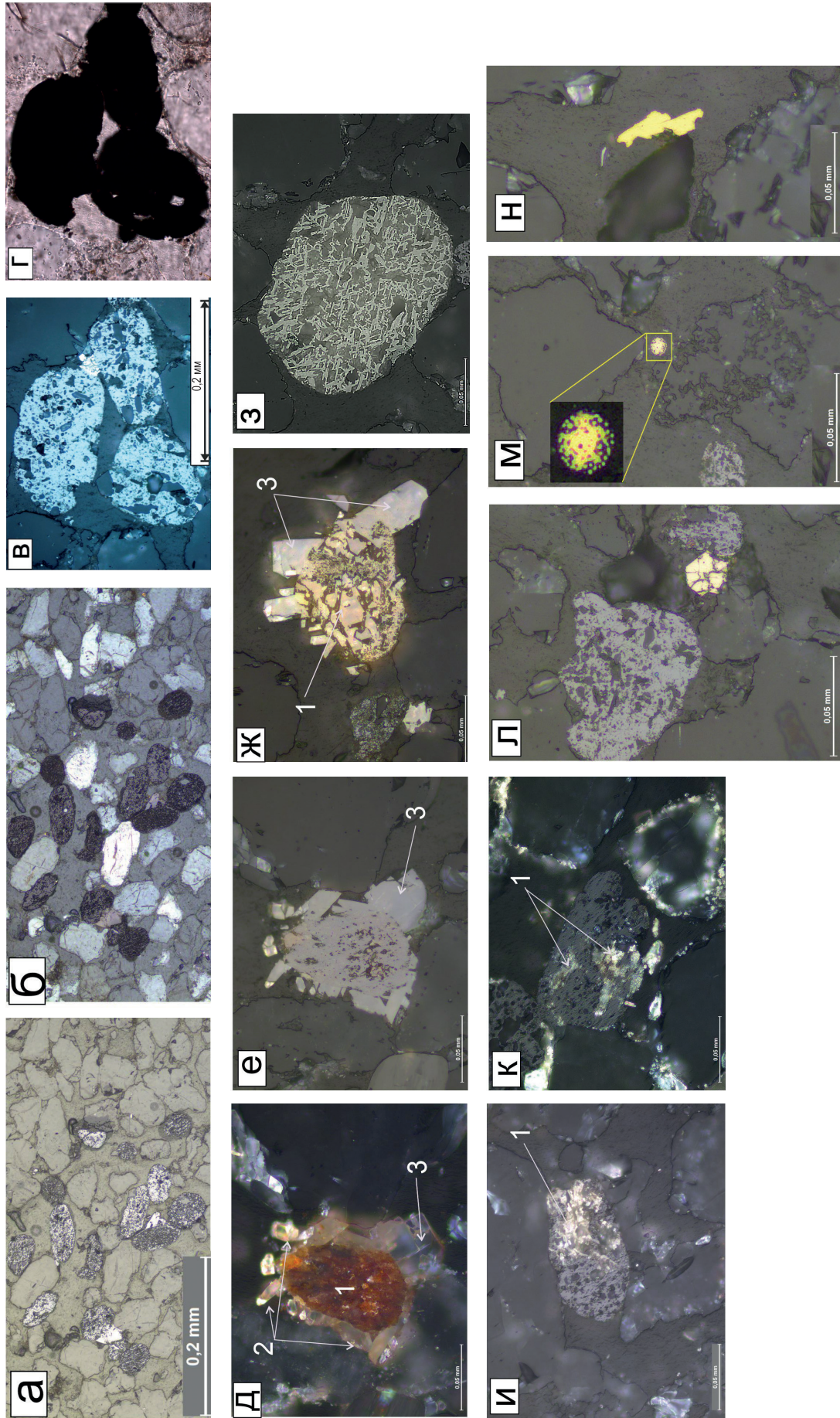


Рис. 3. Рудные минералы в ильменитсодержащих песчаниках

а – вытануто-округлые в различной степени лейкоксенизированные зерна ильменита, без анализатора; б – с анализатором; в – округлые лейкоксенизированные зерна ильменита, отраженный свет; г – то же, проходящий свет; д – псевдоморфный лейкоксеновый агрегат по ильмениту (1) с новообразованными призматическими кристаллами рутила (2) и таблитчатыми – анатаза (3), с анализатором; е – без анализатора; ж – микродруза анатаза (3) на поверхности округлого зерна измененного ильменита (1); з – округлое зерно ильменита с решетчатым рутилом; и – прозрачный рутил в зерне лейкоксенизированного ильменита, с анализатором; к – морфологически сложные («пятнистые») агрегаты прозрачного рутила в зерне ильменита; л – катаклазированный кристалл пирита (желтый); м – фрамбоидр пирита; н – халькопирит

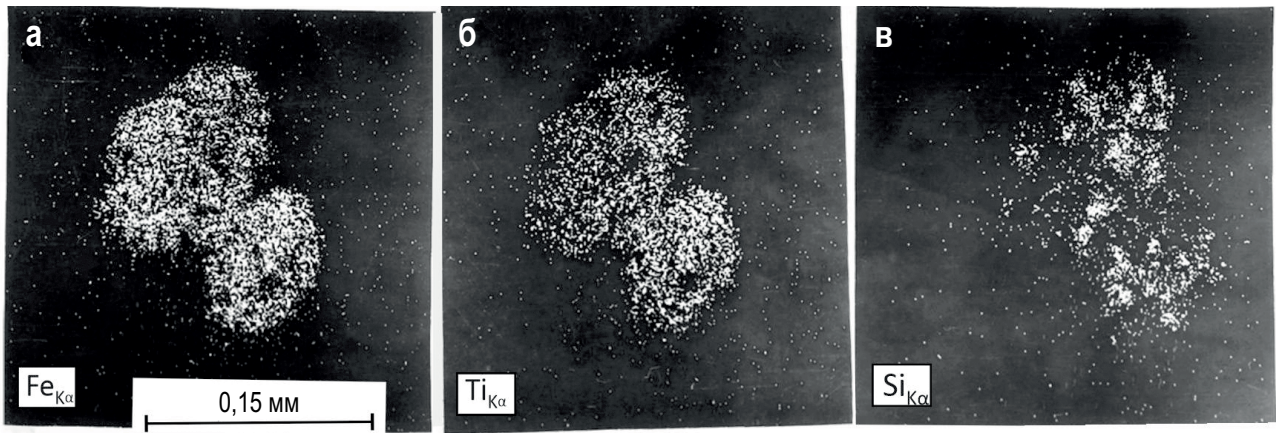


Рис. 4. Изображение в рентгеновских лучах чуплегского ильменита: а – Fe; б – Ti; в – Si. Выполнено в ХАЛ Института Карпинского

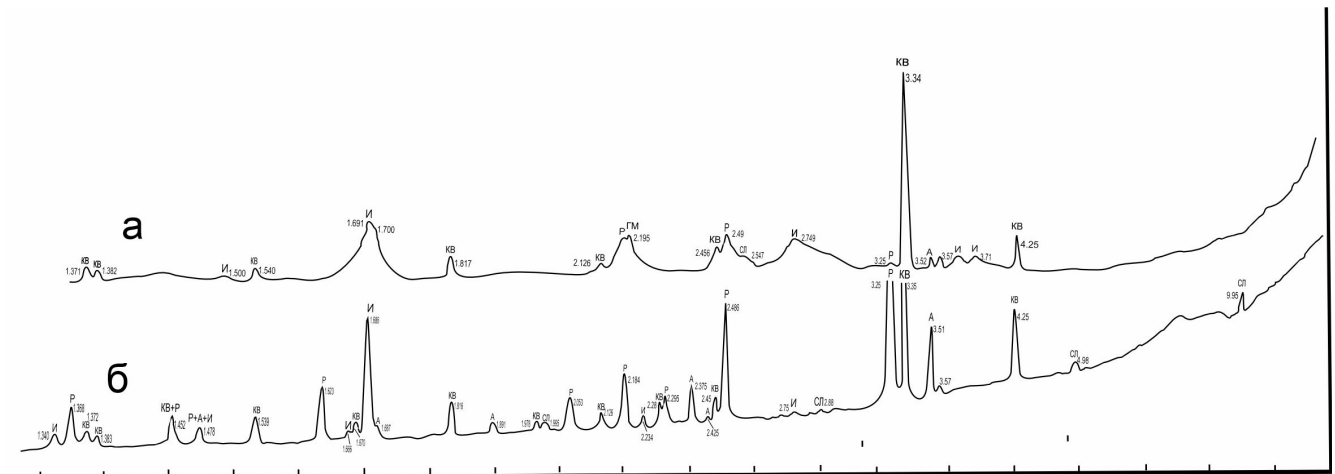


Рис. 5. Дифрактограммы
а – лейкоксенизированного ильменита; б – анатаз-рутилового лейкоксена (скв. 226)

Таблица 1

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа штучной пробы песчаника из Чуплегского рудопроявления

№ пробы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ппп	Σ	V	Cr	Ba
226-6	90,3	0,7331	6,105	2,4476	0,1813	<0,1	0,1749	<0,1	<0,01	<0,05	0,501	100	<0,005	<0,002	<0,0264

Методика изотопного исследования. Цирконы выделены из пробы песчаника с максимальной концентрацией (6,1%) диоксида титана массой около 2 кг после дробления, магнитной сепарации и разделения в тяжелых жидкостях. Вручную отобранные из концентрата зерна цирконов были имплантированы в эпоксидную смолу вместе с зернами стандартов TEMORA и 91500, сошлифованы и приполированы приблизительно на половину своей толщины. Всего изучено 200 зерен обломочного циркона (в проходящем и отраженном свете), а также с целью выявления их внутренней структуры – в режиме катодолюминесценции (рис. 6). Из них для проведения U-Pb геохронологических исследований было выбрано 60 представительных зерен различных морфо-

типов, предположительно характеризующих все источники сноса.

В целом все зерна детритового циркона не крупнее 150 мкм, изометричные и овальные, короткопризматические (коэффициент удлинения, КУ до 2) и призматические с КУ = 2–3. Зерна несут следы длительной транспортировки, четкие внешние кристаллографические формы отсутствуют. Внутреннее строение кристаллов многообразно в связи с разнообразием их источников. Присутствуют зерна циркона явно магматической природы с тонкой осцилляторной зональностью, а также, вероятно, метаморфические нерегулярно- и секториально-зональные и однородные. Отмечаются кристаллы сложного строения, состоящие из ядер и оболочек.

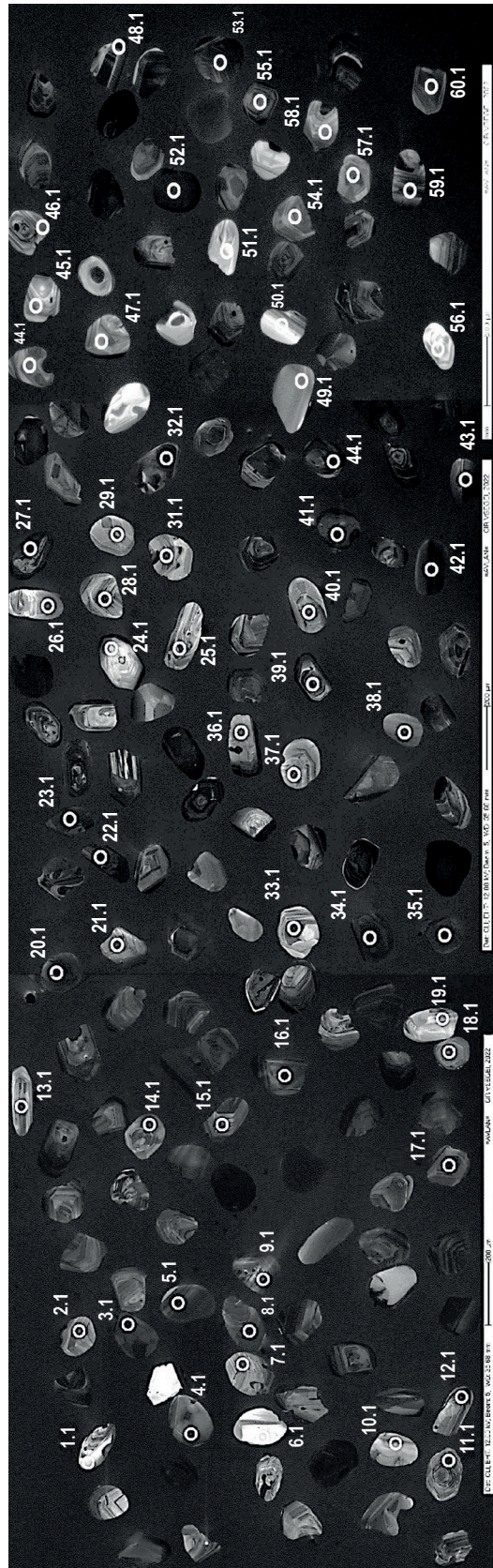


Рис. 6. Оптические изображения цирконов из песчаников обр. 226-2022 в проходящем свете (вверху) и катодолуминесцентные изображения тех же кристаллов цирконов с местами кратеров вторично-ионного пробоя инструмента SIMS SHRIMP-II (диаметр – 30 мкм)
Номера кратеров соответствуют таковым в табл. 3

Изотопные геохронологические исследования цирконов U-Pb методом проводились на вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-IIe по стандартной методике [21]. Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода составляла 4 нА, размер пятна пробоотбора (кратера) – 25 × 20 × 2 мкм. Обработка полученных данных осуществлялась с использованием программы SQUID [23]. U-Pb отношения нормализовались на значение 0,0668, принятое для стандарта TEMORA с возрастом 416,75 млн лет [22]. Стандарт 91500 использовался как концентрационный на U. Погрешности при калибровке стандартов составляли 0,33%. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне одной сигма, погрешности вычисленных конкордантных возрастов и пересечений с конкордией приводятся на уровне двух сигм. Построение графика с конкордией проводилось с использованием программы ISOPLOT/EX [22].

Результаты и их обсуждение. Результаты изотопного датирования детритового циркона из песчаника Чуплегского россыпного проявления (обр. 226-2022) представлены на рис. 7, 8 и в табл. 2, 3. Установлено, что 85% полученных значений возраста конкордантны (дискордантность не более 5%, за исключением зерен 1, 2, 6, 19, 31, 45, 50, 56, 58; табл. 2) На рис. 8 присутствуют 13 отчетливых пиков, соответствующих времени образования детритовых цирконов, поступивших как минимум из 13 различных источников сноса (см. также табл. 3) – 565, 1015, 1175, 1240, 1325, 1470, 1550, 1640, 1830, 1950, 2060, 2715 и 2850 млн лет (с погрешностью 1–2%).

Наибольший интерес для оценки возраста исследуемого песчаника представляет самый молодой из изученных цирконов, определяющий нижнюю возрастную границу его образования. Этот кристалл (№ 11, табл. 3) эвгдральный, короткопризматический, гиацинтового габитуса, с отчетливой осцилляторной зональностью и хорошо сохранившимися ребрами и вершинами. Ядро и включения отсутствуют, а степень абразии и резорбции поверхности граней слабая. Все это указывает на магматическое происхождение и незначительную дистанцию переноса. Геохимические параметры этого циркона (сравнительно высокое Th/U – 0,8 и низкое содержание U – 142 г/т) позволяют предполагать его происхождение из магматических пород среднего-основного состава. В пределах северной части Русской плиты наиболее близкими по возрасту проявлениями магматизма считаются вендские дайки долеритов, которые широко распространены недалеко от Чуплегского проявления – на Онежском полуострове [9 и др.]. Таким образом, формирование Чуплегской россыпи произошло уже после завершения вендского этапа дайкового магматизма в Заонежье.

Среди детритовых зерен циркона резко доминирует (49%) среднерифейская популяция с возрастными 1015–1175–1240–1325 млн лет с очевид-

ным преобладанием (25%) кластера 1175 млн лет, который, исходя из параметров отдельных зерен, скорее всего имеет не один источник сноса. Тем не менее общая геохимическая специфика среднерифейских цирконов позволяет рассматривать их как дериваты обычных коровых пород гранитоидного состава. То же в геохимическом плане можно сказать относительно и раннерифейской популяции (всего 12% от общей) с кластерами 1470–1550–1640 млн лет и палеопротерозойской (15%) 1830–1950–2060 млн лет. При этом немногочисленные (7%) цирконы архейского возраста (2715 и 2850 млн лет) имеют очень низкие содержания урана, что указывает на их происхождение из магматических пород основного состава. Зерна позднерифейского возраста могли поступать в протерозойские осадки, а позже в вендские рудные россыпи в результате неоднократного рециклинга, при этом сохраняя исходные параметры U-Pb изотопной системы.

Обращает на себя внимание наличие огромных разрывов в линейке возрастных кластеров детритовых цирконов, свидетельствующих об отсутствии соответствующих геологических событий

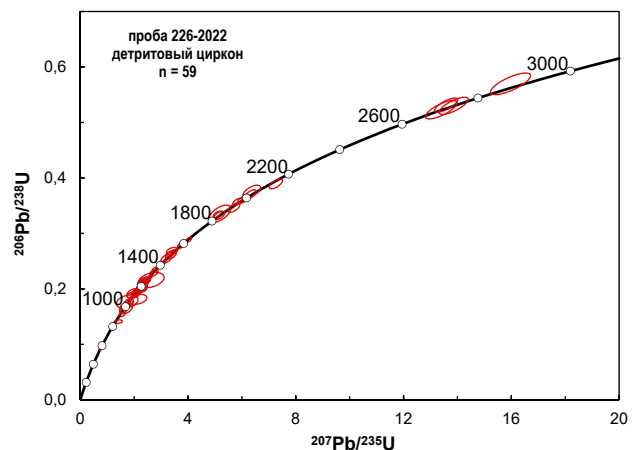


Рис. 7. Диаграмма Аренса-Везерилла с конкордией для детритовых цирконов из Чуплегской россыпи. Эллипсы ошибок – 2σ

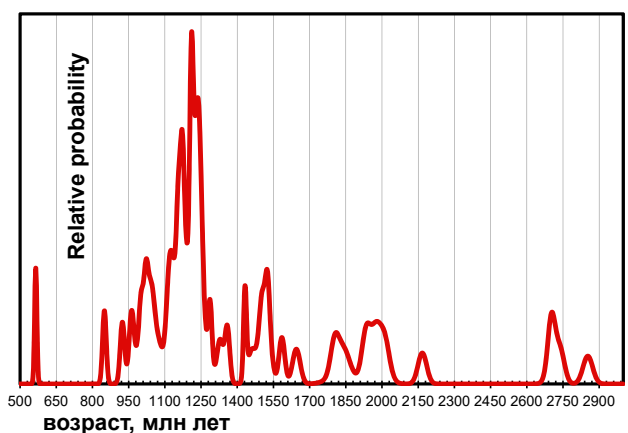


Рис. 8. График частоты встречаемости возрастов детритовых цирконов из песчаника обр. 226-2022 (n = 59)

Таблица 2

Результаты U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe) изотопных анализов зерен детритового циркона (n = 59) из песчаников россыпь, Архангельская область

Зерно/ кратер	²⁰⁶ Pb _c , %	U, г/г	Th, г/г	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*, г/г	Возраст по ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	Возраст по ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±%	Kk
11.1	0,18	142	115	0,83	11,2	±5	595	0,0598	2,8	0,755	3,0	0,0916	0,9	0,30
45.1	1,61	164	57	0,36	20,2	±8	996	0,0724	4,4	1,405	4,5	0,1409	1,0	0,21
2.1	0,19	76	31	0,42	10,1	±9	1012	0,0729	2,8	1,550	3,0	0,1541	1,1	0,35
21.1	0,01	84	37	0,45	11,6	±10	992	0,0722	2,9	1,602	3,1	0,1609	1,1	0,35
56.1	0,37	53	23	0,46	7,5	±22	1059	0,0746	5,4	1,697	5,9	0,1649	2,4	0,41
31.1	0,48	122	35	0,29	17,7	±9	920	0,0697	3,1	1,616	3,3	0,1681	1,0	0,30
28.1	0,13	126	45	0,37	18,5	±9	1015	0,0730	2,1	1,728	2,3	0,1716	0,9	0,41
47.1	0,22	65	17	0,26	9,7	±13	1043	0,0740	3,8	1,771	4,0	0,1735	1,4	0,35
37.1	0,29	75	26	0,36	11,4	±12	1054	0,0745	3,4	1,811	3,7	0,1764	1,3	0,34
50.1	0,94	22	19	0,92	3,3	±27	963	0,0712	8,9	1,740	9,4	0,1769	2,8	0,30
19.1	0,49	24	17	0,71	3,8	±19	1329	0,0856	5,9	2,140	6,3	0,1812	2,0	0,31
49.1	0,55	95	61	0,67	15,5	±12	1063	0,0748	4,4	1,945	4,5	0,1887	1,2	0,26
7.1	0,41	63	26	0,43	10,4	±12	1127	0,0772	3,1	2,029	3,3	0,1905	1,2	0,35
1.1	0,59	24	17	0,72	4,0	±19	1067	0,0749	4,9	1,980	5,2	0,1919	1,8	0,35
36.1	0,27	86	24	0,29	14,2	±14	1139	0,0777	2,5	2,071	2,8	0,1933	1,3	0,47
13.1	0,23	57	32	0,59	9,6	±13	1141	0,0778	2,7	2,101	3,0	0,1959	1,2	0,40
34.1	0,06	259	68	0,27	43,7	±7	1170	0,0789	1,2	2,136	1,4	0,1963	0,7	0,49
53.1	0,24	248	77	0,32	42,4	±8	1179	0,0793	2,2	2,170	2,3	0,1985	0,8	0,34
58.1	0,48	86	131	1,59	14,7	±13	1249	0,0821	3,7	2,257	3,9	0,1993	1,3	0,35
8.1	0,01	210	58	0,28	36,0	±7	1151	0,0782	1,2	2,151	1,3	0,1996	0,7	0,50
16.1	0,22	113	33	0,30	19,7	±10	1189	0,0797	2,1	2,215	2,2	0,2016	0,9	0,40
51.1	0,30	60	31	0,53	10,5	±16	1245	0,0820	3,4	2,285	3,7	0,2022	1,4	0,40
25.1	0,17	61	42	0,71	10,7	±13	1189	0,0797	2,4	2,256	2,7	0,2054	1,2	0,44
48.1	0,09	426	208	0,51	75,6	±7	1178	0,0792	1,4	2,253	1,5	0,2063	0,6	0,41
43.1	0,05	235	353	1,56	41,6	±7	1200	0,0801	1,2	2,281	1,3	0,2065	0,6	0,48
23.1	0,12	243	82	0,35	43,4	±14	1200	0,0801	1,5	2,289	2,0	0,2072	1,2	0,64
59.1	0,11	368	158	0,45	65,5	±8	1237	0,0816	1,3	2,333	1,5	0,2073	0,8	0,51
60.1	0,14	130	33	0,26	23,5	±11	1207	0,0804	2,7	2,329	2,8	0,2101	1,0	0,36
4.1	0,18	87	119	1,41	15,8	±11	1251	0,0822	2,0	2,383	2,3	0,2102	1,0	0,43

38.1	0,18	78	38	0,50	14,2	1230	±13	1185	±59	0,0795	3,0	2,305	3,2	0,2103	1,2	0,37
5.1	0,05	173	51	0,31	31,5	1240	±9	1237	±25	0,0816	1,3	2,387	1,5	0,2121	0,8	0,55
15.1	0,18	78	22	0,29	14,3	1245	±12	1247	±41	0,0821	2,1	2,410	2,4	0,2130	1,1	0,45
44.1	0,25	95	26	0,28	17,5	1250	±11	1212	±55	0,0806	2,8	2,379	3,0	0,2140	1,0	0,33
10.1	0,30	39	26	0,68	7,3	1252	±16	1228	±64	0,0813	3,3	2,403	3,5	0,2144	1,4	0,39
6.1	0,86	11	6	0,53	2,1	1260	±30	1388	±140	0,0883	7,1	2,630	7,5	0,2159	2,6	0,35
32.1	0,04	266	114	0,44	50,5	1288	±8	1310	±21	0,0847	1,1	2,583	1,3	0,2211	0,7	0,55
39.1	0,15	79	46	0,60	15,6	1329	±13	1351	±40	0,0866	2,1	2,733	2,3	0,2290	1,1	0,47
17.1	0,11	128	66	0,53	25,8	1359	±10	1335	±29	0,0859	1,5	2,779	1,7	0,2347	0,8	0,49
42.1	0,04	458	98	0,22	98,0	1432	±6	1437	±14	0,0905	0,8	3,106	0,9	0,2488	0,5	0,54
26.1	0,27	76	25	0,34	16,6	1460	±17	1448	±43	0,0911	2,3	3,192	2,6	0,2543	1,3	0,49
40.1	0,17	74	45	0,62	16,6	1498	±16	1492	±41	0,0932	2,2	3,361	2,5	0,2615	1,2	0,48
3.1	0,10	172	55	0,33	38,8	1504	±11	1476	±27	0,0924	1,4	3,347	1,6	0,2627	0,8	0,50
22.1	0,14	233	102	0,45	53,6	1525	±9	1520	±23	0,0946	1,2	3,480	1,4	0,2668	0,7	0,48
55.1	0,32	117	42	0,37	27,1	1532	±14	1465	±41	0,0919	2,2	3,398	2,4	0,2682	1,0	0,43
46.1	0,01	158	111	0,72	37,8	1585	±12	1574	±23	0,0974	1,3	3,741	1,5	0,2787	0,9	0,57
27.1	0,03	247	25	0,10	61,1	1633	±10	1645	±16	0,1011	0,9	4,020	1,1	0,2883	0,7	0,60
57.1	0,11	146	112	0,79	41,7	1850	±15	1841	±24	0,1126	1,3	5,159	1,6	0,3324	0,9	0,56
41.1	0,07	137	33	0,25	39,5	1859	±12	1804	±17	0,1103	0,9	5,083	1,2	0,3343	0,7	0,61
24.1	0,38	33	28	0,87	9,5	1865	±30	1833	±46	0,1120	2,6	5,180	3,2	0,3355	1,9	0,59
9.1	0,08	79	39	0,50	23,5	1917	±16	1947	±22	0,1194	1,3	5,702	1,6	0,3463	1,0	0,62
35.1	0,07	197	90	0,47	60,4	1967	±13	1932	±17	0,1184	0,9	5,825	1,2	0,3568	0,8	0,64
20.1	0,10	147	55	0,39	45,7	1986	±14	1976	±18	0,1213	10,0	6,036	1,3	0,3608	0,8	0,62
52.1	0,14	185	66	0,37	59,0	2030	±16	2011	±19	0,1237	1,1	6,314	1,4	0,3701	0,9	0,66
54.1	0,15	72	36	0,51	23,3	2057	±22	1998	±29	0,1229	1,7	6,370	2,1	0,3759	1,2	0,59
12.1	0,05	87	30	0,36	29,1	2119	±17	2167	±18	0,1353	1,1	7,260	1,4	0,3893	0,9	0,66
14.1	0,09	38	18	0,48	17,0	2712	±30	2705	±20	0,1858	1,2	13,40	1,8	0,5230	1,3	0,75
29.1	0,08	55	37	0,69	25,0	2741	±28	2739	±18	0,1896	1,1	13,86	1,6	0,5300	1,2	0,76
33.1	0,08	94	91	1,01	42,7	2746	±22	2702	±14	0,1854	0,9	13,58	1,3	0,5312	1,0	0,76
18.1	0,14	38	16	0,44	18,4	2906	±33	2853	±20	0,2033	1,2	15,970	1,9	0,5696	1,4	0,75

Примечание. Погрешности приведены на уровне 1 σ . Rb и Rb* – свинец обыкновенный и радиогенный соответственно. Изотопные отношения и содержания ²⁰⁶Pb скорректированы по измеренному ²⁰⁴Pb. Возраст – в млн лет. Погрешность калибровки по стандарту Темога 0,33%. Kk – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U. Номера кратеров соответствуют номерам на каталоге минеральных изображений цирконов.

не противоречит существующему представлению [18] о вендском возрасте вмещающей его терригенной толщ.

3. При оценке потенциальной промышленной значимости Чуплегского проявления следует учитывать, что Россия, располагая крупнейшим в мире Ярегским россыпным месторождением титановых руд, из-за их технологически трудной обогащенности остается по этому сырью импортозависимой. Чуплегский рудный компонент, в отличие от ярегского, эпигенетически менее преобразован, что позволяет предположить возможность переработки чуплегского титанового сырья по дешевым технологиям. Эта важная альтернатива может быть решена лабораторным изучением ильменит-содержащих песчаников из керна скв. 226.

Авторы признательны главному научному сотруднику ИГГД РАН С. Д. Великославинскому, сотрудникам Института Карпинского В. Н. Зелепугину, В. Ф. Николаеву за конструктивную критику рукописи и ценные рекомендации и В. Д. Ляхницкой за помощь в минераграфической характеристике ильменита, а также бывшей сотруднице того же института М. А. Лисицыной за полевые и камеральные минералого-геохимические исследования Чуплегского рудопроявления, результаты которых [14] использованы в этой статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валеев Р. Н. Авлакогены Восточно-Европейской платформы. – М.: Недра, 1978. – 153 с.
2. Гегель Г. В. Ф. Сочинения: научная литература. Т. 4. Система наук. Ч. 1. Феноменология духа. – М.: Изд-во социально-экономической литературы, 1959. – 487 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Мезенская. Лист Q-37 – Архангельск. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Мезенская. Лист Q-38 – Мезень / В. А. Журавлев, В. Ф. Куприн, Л. И. Лукьянова, М. С. Парамонова и др. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012.
5. Калужный В. А. Геология новых россыпеобразующих метаморфических формаций. – М.: Наука, 1982. – 264 с.
6. Колокольцев В. Г. Блочные метасоматиты в осадочных толщах и их диагностика. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. – 96 с.
7. Колокольцев В. Г. Новое о титаноносности Ярегского рудного узла // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 67. – С. 107–117.
8. Колокольцев В. Г., Сергеев С. А. Происхождение и U-Pb изотопный возраст детритовых цирконов Ярегского нефтетитанового и Пижемского титанового месторождений (Тиман) // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 91. – С. 87–96.
9. Коровкин В. А., Турылева Л. В. Недра Северо-Запада Российской Федерации. – СПб., 2003. – 250 с.
10. Кочетков О. С. Акцессорные минералы в древних толщах Тимана и Канина. – Л.: Наука, 1967. – 121 с.
11. Кочетков О. С. Условия образования и размещения древних россыпей Тимана и п-ова Канин // Геология россыпей. – М.: Наука, 1965. – С. 244–249.
12. Макеев А. Б., Красоткина А. О., Скублов С. Г. Геохимия и U-Pb-возраст циркона Пижемского титано-

вого месторождения (Средний Тиман) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2016. – № 5.– С. 38–52.

13. Опытнo-производственные морские геологo-съемочные работы среднего масштаба в северной части Белого моря с целью оценки перспектив его россыпености / Г. Л. Эйхгорн и др. – Л.: ВСЕГЕИ, 1976. – 289 с.
14. Отчет по теме: «Провести прогнозную оценку севера Русской платформы по категории Р3 на комплекс гипергенных месторождений полезных ископаемых (бокситы, фосфориты, россыпи и др.) и разработать рекомендации по направлению поисковых работ» / В. Г. Колокольцев, М. А. Лисицына, Л. Е. Мордберг, Е. Н. Нестерова, К. Э. Якобсон. – Л.: ВСЕГЕИ, 1988.
15. Первые данные о возрасте (U-Pb, SHRIMP-II) и составе циркона из уникального нефтетитанового месторождения Ярегское, Южный Тиман / А. О. Красоткина, С. Г. Скублов, А. Б. Кузнецов и др. // Докл. РАН. Науки о земле. – 2020. – Т. 495, № 2. – С. 9–17.
16. Признаки титаноносных россыпей в юго-восточном Беломорье / В. Г. Колокольцев, М. А. Лисицына, К. С. Мищенко, К. Э. Якобсон // VIII совещание по геологии россыпей (связь россыпей с коренными источниками, россыпеобразующие формации щитов и платформ). Тезисы докладов. – Киев, 1987. – С. 264–265.
17. Рыбалко А. Е. Литология верхнечетвертичных отложений Кандалакшского залива и некоторые вопросы седиментогенеза на гляциальных шельфах // Автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук. – Л., 1976. – 178 с.
18. Станковский А. Ф. Отчет о результатах групповой геологической съемки и доизучении площадей м-ба 1 : 200 000 в Беломорско-Кулойском регионе Архангельской области. – СЗТГУ, 1980.
19. Сушон А. Р. Тиманские поднятия // Россыпные месторождения СССР. – М.: Недра, 1975. – С. 82–95.
20. TEMORA 1: A new zircon standard for U-Pb geochronology / L. P. Black, S. L. Kamo, C. M. Allen, J. N. Aleinikoff, D. W. Davis, R. J. Korsch, C. Foudoulis // Chemical Geology. – 2003. – Vol. 200. – Pp. 155–170.
21. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia / S. Schuth, V. I. Gornyy, J. Berndt, S. S. Shevchenko, S. A. Sergeev, A. F. Karpuzov, T. Mansfeldt // International Journal of Geosciences. – 2012. – Vol. 3, no. 2. – Pp. 289–296.
22. Ludwig K. R. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. – Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2003.
23. Ludwig K. R. SQUID 1.02, A User Manual, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. – Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2001.

REFERENCES

1. Valeev R. N. Avlakogeny Vostochno-Evropеjskoj platformy. Moscow, Nedra, 1978, 153 p.
2. Gegel' G. V. F. Sochinenija: nauchnaja literatura. Vol. 4. Sistema nauk. Ch. 1. Fenomenologija duha. Moscow, Izd-vo social'no-jekonomicheskoy literatury, 1959, 487 p.
3. Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii. Mashtab 1 : 1 000 000. Tre't'e pokolenie. Serija Mezenskaja. List Q-37 – Arhangel'sk [State geological map of the Russian Federation of the third generation. Scale 1 : 1 000 000. Mezenskaja series. Sheet Q-37 – Arhangel'sk]. St. Petersburg, Kartograficheskaja fabrika VSEGEI, 2016.
4. Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii. Mashtab 1 : 1 000 000 (tre't'e pokolenie). Serija Mezenskaja. List Q-38 – Mezen' [State geological map of the Russian Federation of the third generation. Scale 1 : 1 000 000. Mezenskaja series. Sheet Q-38 – Mezen']. Ed. by V. A. Zhuravlev, V. F. Kuprin, L. I. Luk'janova, M. S. Paramonova et al. St. Petersburg, Kartograficheskaja fabrika VSEGEI, 2012.

5. Kaljuzhnyj V. A. Geologija novyh rossypeobrazujushhij metamorficheskijh formacij. Moscow, Nauka, 1982, 264 p.
6. Kolokol'cev V. G. Blochnye metasomatity v osadочnyh tolshhah i ih diagnostika. St. Petersburg, Izd-vo VSEGEI, 1999, 96 p.
7. Kolokol'cev V. G. Novoe o titanonosnosti Jaregskogo rudnogo uzla. *Regional'naja geologija i metallogenija*, 2016, no. 67, pp. 107–117.
8. Kolokol'cev V. G., Sergeev S. A. Proishozhdenie i U-Pb izotopnyj vozrast detritovyh cirkonov Jaregskogo neftetitanovogo i Pizhemsckogo titanovogo mestorozhdenij (Timan). *Regional'naja geologija i metallogenija*, 2022, no. 91, pp. 87–96.
9. Korovkin V. A., Turyleva L. V. Nedra Severo-Zapada Rossijskoj Federacii. St. Petersburg, 2003, 250 p.
10. Kochetkov O. S. Akcessornye mineraly v drevnih tolshhah Timana i Kanina. Leningrad, Nauka, 1967, 121 p.
11. Kochetkov O. S. Uslovija obrazovanija i razmeshhenija drevnih rossypej Timana i p-ova Kanin. *Geologija rossypej*. Moscow, Nauka, 1965, pp. 244–249.
12. Makeev A. B., Krasotkina A. O., Skublov S. G. Geohimija i U-Pb-vozrast cirkona Pizhemsckogo titanovogo mestorozhdenija (Srednij Timan). *Vestnik IG Komi NC UrO RAN*, 2016, no. 5, pp. 38–52.
13. Jеjhgorn G. L. et al. Opytno-proizvodstvennye morskije geologo-сemochnye raboty srednego masshtaba v severnoj chasti Belogo morja s cel'ju ocenki perspektiv ego rossypenosti. Leningrad, VSEGEI, 1976, 289 p.
14. Kolokol'cev V. G., Lisicyna M. A., Mordberg L. E., Nesterova E. N., Jakobson K. Je. Otchet po teme: «Provesti prognoznuju ocenku severa Russkoj platformy po kategorii R3 na kompleks gipergennyh mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh (boksity, fosfority, rossypi i dr.) i razrabotat' rekomendacii po napravleniju poiskovyh rabot». Leningrad, VSEGEI, 1988.
15. Krasotkina A. O., Skublov S. G., Kuznecov A. B. et al. Pervye dannye o vozraste (U-Pb, SHRIMP-II) i sostave cirkona iz unikal'nogo neftetitanovogo mestorozhdenija Jaregskoe, Juzhnyj Timan. *Dokl. RAN. Nauki o zemle*, 2020, vol. 495, no. 2, pp. 9–17.
16. Kolokol'cev V. G., Lisicyna M. A., Mishhenko K. S., Jakobson K. Je. Priznaki titanonosnyh rossypej v jugo-vostochnom Belomor'e. *VIII soveshhanie po geologii rossypej (svjaz' rossypej s korennymi istochnikami, rossypeobrazujushhie formacii shhitov i platform)*. Tezisy dokladov. Kiev, 1987, pp. 264–265.
17. Rybalko A. E. Litologija verhnechetvertichnyh otlozhenij Kandalakshskogo zaliva i nekotorye voprosy sedimentogeneza na glacial'nyh shel'fah. *Avtoref. diss. kand. geol.-mineral. nauk*. Leningrad, 1976, 178 p.
18. Stankovskij A. F. Otchet o rezul'tatah gruppovoj geologicheskoj semki i doizuchenii ploshhadej m-ba 1 : 200 000 v Belomorsko-Kulojskom regione Arhangel'skoj oblasti. SZTGU, 1980.
19. Sushon A. R. Timanskie podnjatija. *Rossypnye mestorozhdenija SSSR*. Moscow, Nedra, 1975, pp. 82–95.
20. Black L. P., Kamo S. L., Allen C. M., Aleinikoff J. N., Davis D. W., Korsch R. J., Foudoulis C. TEMORA 1: A new zircon standard for U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 2003, vol. 200, pp. 155–170.
21. Schuth S., Gornyy V. I., Berndt J., Shevchenko S. S., Sergeev S. A., Karpuzov A. F., Mansfeldt T. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia. *International Journal of Geosciences*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 289–296.
22. Ludwig K. R. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, Geochronology Center Special Publication, 2003.
23. Ludwig K. R. SQUID 1.02, A User Manual, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, Geochronology Center Special Publication, 2001.

Колокольцев Вячеслав Григорьевич – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник. <kolokoltsev@rambler.ru>
Сергеев Сергей Андреевич – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр изотопных исследований.
 <sergey_sergeev@vsegei.ru>

Kolokol'tsev Vyacheslav Grigor'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher.
 <kolokoltsev@rambler.ru>
Sergeev Sergey Andreevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of Isotopic Research.
 <sergey_sergeev@vsegei.ru>

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (Институт Карпинского). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (Karpinsky Institute). 74 Sredny pr., St. Petersburg, Russia, 199106.