

Урановорудные эпохи как отражение в земной коре импульсов внутренней энергии Земли

На основе анализа мировой базы данных по палеонапряженности магнитного поля Земли (6185 определений) установлена согласованность экстремальных значений (макс и мин) палеонапряженности с эпохами диастрофизма (складчатости и тафрогенеза). Уровень палеонапряженности связывается с ротационным режимом планеты. Основные эпохи уранового рудогенеза скоррелированы с двумя энергетически различающимися типами геодинамических обстановок: 1 – поздними стадиями оформления суперконтинентов (Пангей), т. е. максимального площадного развития зрелой континентальной коры; 2 – началом распада суперконтинентов, т. е. деструкции этой коры. Подчеркивается особая роль в урановом рудогенезе режима сводово-глыбовой и глыбовой реювенации ранее сформированных геохимических и рудных ресурсов. Предложена новая формулировка понятия «металлогеническая эпоха», исходя из которой следует корректировать методологию прогнозных исследований.

Ключевые слова: *палеонапряженность магнитного поля, металлогеническая эпоха, металлогения, уран.*

E. M. PINSKY, YU. B. MIRONOV, G. V. AFANASIEV (VSEGEI)

Uranium ore epochs as a reflection in the Earth's crust of impulses of the Earth' internal energy

Consistency of extreme values (max and min) of paleointensity with diastrophism epochs (folding and extensional rifting) has been identified based on the analysis of the global database of the Earth's magnetic field (6185 determinations). Level of paleointensity is associated with rotary regime of the planet. Main epochs of uranium ore formation were correlated with two energetically different types of geodynamic environment: 1 – late stages of supercontinents' formation (Pangaea), i.e., maximum areal development of the mature continental crust; 2 – beginning of supercontinents disintegration, i.e., crust destruction. Particular role of the regime of dome-block and block rejuvenation of previously formed geochemical and ore resources in the uranium ore genesis is emphasized. New formulation of the concept "metallogenic epoch" is proposed based on which the methodology of predictive studies is to be corrected.

Keywords: *paleomagnetic field, metallogenic epoch, metallogeny, uran.*

Более чем 100-летняя история существования термина «минерагеническая эпоха», введенного Д. Делоне (1911) и определявшего его как «период повышенной металлогенической интенсивности», не выявила физической сущности скрытого за термином понятия, оставив его сугобо эмпирическим. Достаточно убедиться в смысловой тождественности определений у Ю. А. Билибина [4] в современных российском [5] и американском геологических словарях [20] – все они означают лишь период геологической истории, наиболее благоприятный для формирования руд. Одна из современных попыток количественной идентификации металлогенических эпох заключалась в статистическом установлении превышения числа месторождений определённого типа для выбранного временного интервала относительно некоторых средних норм [21]. Однако, как признали авторы, распределение месторождений во времени из-за сложного характера взаимосвязей геологических процессов с вероятностной точки зрения непредсказуемо. Таким образом, вне эмпирической статистики, казалось бы, нет возможности обосновать существование металлогенической эпохи на изучаемых территориях.

Для более уверенного прогнозирования месторождений необходимо понимание, каковы наиболее

существенные физические предпосылки их локализации именно в данный промежуток геологического времени. Важно также отличать глобальные эпохи, несущие месторождения-гиганты, от региональных эпох, потенциал которых во многих случаях не столь масштабен. Только оживив эмпирические данные теоретическими материалами, можно попытаться вскрыть отличия рудных эпох от безрудных. Сам факт наличия металлогенических эпох, проявленных близко одновременно на различных континентах, свидетельствует о необходимости привлечения для их объяснения надрегиональных явлений, общепланетарных сил. Возникает насущная необходимость дополнить геодинамические реконструкции количественными характеристиками интенсивности проявления разного физического состояния земных недр. Такими характеристиками обладают прежде всего геофизические индикаторы. Известно, что каждой геодинамической обстановке присущ свой специфический набор геофизических параметров.

Особую привлекательность имеет магнитное поле, палеонапряженность (H_a) которого представляет собой параметрическую характеристику древнего магнитного поля Земли, восстановленного по остаточной намагниченности минералов и исклю-

чающего вторичную намагниченность, приобретаемую с течением времени по разным причинам [1].

Хотя сегодня нет единой точки зрения на механизм возникновения магнитного поля планет, почти общепризнана гипотеза магнитного геодинамо, основанная на существовании тепловой конвекции токопроводящего жидкого внешнего ядра.

Современная физика трактует напряженность магнитного поля как проявление внутренней энергии. В системе СИ Ha имеет размерность в теслах (Т). В настоящей работе она выражена в микро-теслах (мкТ).

Энергетическая сущность Ha позволяет рассматривать числовые характеристики этого параметра в качестве обобщенного показателя вариаций импульсов внутренней энергии планеты в ходе её существования в космическом пространстве. Нами предполагается, что такие вариации энергии могут проявлять себя и в функционировании различных глобальных и региональных геодинамических событий. Для проверки этого предположения мы воспользовались материалами мировой базы данных по Ha магнитного поля Земли [22], сопоставив ее временные вариации с установленными глобальными и региональными эпохами диастрофизма — тектоническими деформациями земной коры, независимо от их характера (орогенез, складчатость, рифтообразование, спрединг, коллизия плит и блоков и др.), происходящими под воздействием внутренней энергии Земли [15, с. 412–413].

В 1998 г. Д. М. Печерский [14] обобщил мировые данные по Ha от современности до 1745 млн лет. Мы добавили к ним материалы на середину 2015 г. [22]. В обработку были включены 6185 единичных анализов, 1170 коллекций, из которых сформирована 81 выборка десятиллионных временных интервалов, на каждый рассчитаны средние значения Ha . Для элиминации влияния на величину Ha географической широты мест опробования все данные мировой базы данных пересчитаны (нормированы) на широту экватора. К сожалению, неполнота базы не даёт оснований для уверенной интерпретации полученных результатов докембрийских эпох, 35 % всех имеющихся замеров Ha моложе одного миллиона лет. Лишь 9 % аналитических данных характеризуют докембрий. Для многих временных интервалов докембрия средние значения с позиций статистических критериев рассматриваются нами как предварительные. Тем не менее совокупные результаты демонстрируют надежные возможности выбранного направления исследований.

Общая картина скачков Ha магнитного поля на период до 1900 млн лет, построенная по материалам [14, 22], отражена на рис. 1.

Среднее арифметическое содержание Ha для интервала от современности до 1900 млн лет — 27,1 (мин 0,8 — макс 70,0 мкТ), коэффициент вариации 60,1 %. Линия среднего значения Ha отсекает периоды проявления в земной коре пониженных и повышенных энергетических потенциалов. Использование параметрической характеристики Ha позволяет отделять глобальные циклы от региональных. Величина Ha для глобальных циклов (от 50 мкТ и выше) более чем в два раза превышает среднее значение, для региональных циклов — более чем в 1,5 раза (от 40 до 50 мкТ).

Возраст всех максимумов на кривой Ha оказался в полном соответствии с возрастами глобальных и региональных эпох диастрофизма [15,

с. 412–413]. Все три главных максимума на кривой Ha — 250–1100–1750 млн лет (гондванский, гренвилльский, сфекофенский) — отвечают известным кульминационным моментам генерации континентальной коры. Региональные фазы складчатости (ларамийская, заальская, уральская, байкальская, янцзы и др.) также находят свою возрастную привязку к известным геологическим обобщениям.

Аппроксимация линии тренда полиномом 3-й степени (пунктирная синусоидальная кривая на рис. 1) свидетельствует о существовании глобального циклического процесса (чередование продолжительных относительно энергетически спокойных и более активных интервалов геологического времени). Длительность глобальных циклов установлена из анализа кривой Ha — 800 млн лет, что также полностью соответствует известным данным о периодичности глобальной металлогенической эволюции Земли — 800 ± 100 млн лет [17].

Как и абсолютное большинство известных геологических циклов, 800-миллионные циклы не являются идеальными периодическими процессами. Для большей наглядности такой изменчивости энергетической характеристики эволюции геологических процессов воспользуемся анализом не простых значений Ha , а экспоненциальной функцией от Ha в виде $f(Ha) = e^{Ha}$. На рис. 2 подчеркивается важная особенность эволюции энергетики Земли — уменьшение энергетической насыщенности от более древних циклов к молодым.

Повышенная Ha связана с эффектами сжатия литосферы, отражающимися в эпохах орогенеза, складчатости, а в литостратиграфических циклах — в стадии регрессии и суши. Пониженная Ha коррелирует со временем накопления осадочных толщ, преобладанием литостратиграфических стадий моря и трансгрессий, характеризует эпохи формирования платформенного чехла, рифтогенных впадин, авлакогенов, крупных грабенов субплатформенных обстановок, т. е. соответствует растяжению литосферы.

На рис. 1 звёздами обозначено наличие крупных урановых месторождений и рудных районов в соответствующем возрастном интервале. Все они тяготеют к экстремальным (макс–мин) значениям величины Ha .

Если бы единственной определяющей причиной возникновения металлогенических эпох были внешние космические силы, то сами эпохи всегда оставались бы планетарными, т. е. проявлялись бы на большинстве континентов. С другой стороны, если бы не было существенного влияния единой для всей планеты внешней силы, то все эпохи рудо-генеза носили бы региональный характер.

Реальность близко одновременных глобальных геологических событий, в том числе и металлогенических эпох, обеспечивается периодами существования единых суперконтинентов — Пангей. После распада Пангей близкие по геодинамической основе события происходили на разных континентах не одновременно. Примеры крупных рудных районов, возникших в период планетарных урановорудных эпох:

— Пангея 0 — 2500–2200 млн лет (Витватерсранд — Южная Африка, Блайнд-Ривер — Канада, Сьерра-ди-Жакобина, Железорудный Четырехугольник — Бразилия, Чикамагалур — Индия, ураноносные конгломераты в блоках Пилбара и Кимберли — Австралия);

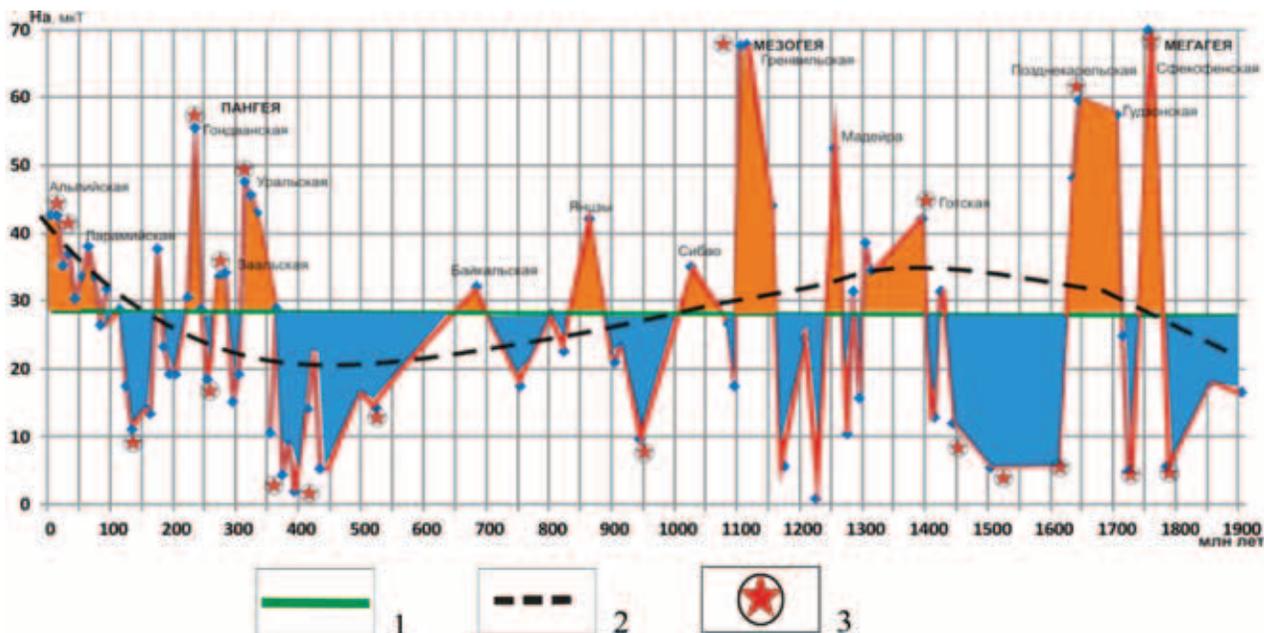


Рис. 1. Импульсы H_a магнитного поля Земли и эпохи диастрофизма

1 – линия среднего значения H_a (27,1 мкТ); 2 – аппроксимация тренда полиномом 3-й степени; 3 – крупные урановые месторождения

– Пангея I (Мегагея, Колумбия, Нана) – 1900–1700 млн лет (Украинский щит – Европа, Биверлодж – Канада, Франсвилль – Габон, Палабора – Южная Африка, Рам-Джангл – Австралия, Арьеplug-Арвидсьяур – Швеция, Нуоттиярви – Финляндия, Онежская группа – Россия);

– Пангея II (Мезогея) – 1100–900 млн лет (Илимауссак – Гренландия, эпохи перераспределения рудного вещества в месторождениях несогласия Канады и Австралии);

– Пангея III (Пангея) – 290–230 млн лет (Средиземноморский пояс, Франко-Чешский массив, переотложенные руды районов Атабаска, Пайн-Крик в Австралии и каледонского оруденения Кокчетавского массива).

Региональные эпохи приурочены к заключительным стадиям геотектонических циклов: каледонского 360 ± 20 млн лет (Северный Казахстан), мезозойского 65 ± 20 млн лет (Буреинский массив, Южный Китай), современного 5–0 млн лет (Лангер-Хейнрих – Намибия, Йиллири – Австралия) либо к границам геологических эпох: триаса и юры 210–190 млн лет (угленосные впадины Прибалхашья, Мали-Нигерская синеклиза), юры и мела, 140–120 млн лет (палеодолины в Северном Казахстане, сводово-глыбовая активизация Забайкалья, Алдана, досбросовые руды Минерального пояса Грантс), мела и палеогена (Колорадо, Кызылкум), неогена и четвертичного периода (Вайоминг, Чу-Сарысу, Суля). Региональные эпохи могут быть также связаны со временем завершения магматизма в складчатом поясе – 510 млн лет (Россинг – Намибия).

Интересно, что эпохи крупных месторождений тяготеют как к максимумам, так и к минимумам H_a . Отличительной чертой максимумов являются преимущественно эндогенные урановые месторождения в парагенетической связи с интрузивным магматизмом, а для минимумов характерны гидрогенные месторождения в осадочных комплексах и гидротермальные, сопровождаемые контраст-

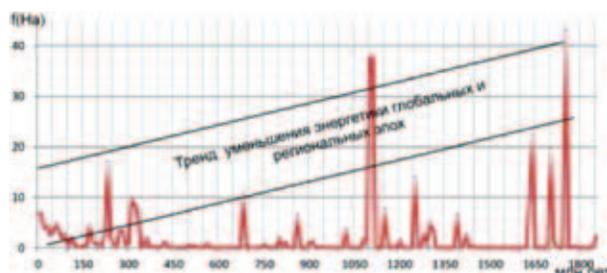


Рис. 2. Цикличность максимумов H_a и тренд снижения расхода энергии в эволюции геологических процессов

ными вулканическими комплексами с мантийными базальтоидами. Принципиально важно, что во всех случаях только высоkozрелая кратонизированная континентальная кора служила основой для заложения всех промышленно значимых урановорудных провинций.

Приуроченность оруденения к максимумам H_a магнитного поля объяснима корреляцией H_a с повышенным энергетическим состоянием геологических систем, обеспечивающим более активную миграцию химических элементов, что ведёт к приумноженному накоплению на геохимических барьерах. Но чем же обеспечивается возможность крупномасштабного рудоотложения в периоды минимумов H_a ? Наибольшие энергетические затраты свойственны формированию складчатых структур, что хорошо отражено на кривой H_a (рис. 1). Структуры погружений или сводово-глыбовых поднятий требуют меньших энергетических затрат. Энергетический потенциал геодинамического режима зависит от относительного соотношения источников энергии – коровых и мантийных производных в едином процессе [2]. При преобладании мантийных производных создаются сквозькоровые (корово-мантийные) структурно-вещественные типы геодинамических режимов с повышенными значениями H_a . При ограниченном привносе мантийной

энергии и мантийного материала формируются коровые (мантийно-коровые) структуры с пониженными значениями *Ha*. Важный шаг в понимании происхождения металлогенических эпох в периоды минимумов *Ha* — предложение А. М. Карпунина и соавторов [9] объединить для уранового оруденения в осадочных бассейнах геохимическую (время создания надкларковых концентраций) и металлогеническую эпохи (время формирования рудных объектов) в одно понятие «урановый седиментогенез». При этом образуются латеральные ряды урановорудных формаций: синседиментационные (осадочно-диагенетические, черносланцевые), экзодиагенетические (грунтовой и пластовой инфильтрации) и гидротермально-метасоматические в вулкано-тектонических структурах [7]. Эпохи уранового седиментогенеза фиксируются на кривой *Ha* пониженной энергетической дифференцированностью, но именно в такие периоды реализуются инфильтрационный и компрессионный механизмы, вызывающие активное движение флюидов, переносащих полезные компоненты [10].

Можно констатировать, что в числовом параметре *Ha* магнитного поля выявляется единая, энергетически обусловленная обобщенная характеристика различных геодинамических обстановок, позволяющая дифференцировать их на количественной основе. Смена геодинамических обстановок отражается на кривой *Ha* сменой градиентов. Наиболее высокие градиенты связаны с глобальными циклами диастрофизма, совмещёнными с эпохами тектоно-магматических активизаций, выраженных в частности в формировании крупных магматических провинций (LIP).

Возрастные интервалы наиболее значимых градиентов *Ha*, которые выступают в качестве урановорудных эпох, перечислены в таблице.

Большинство урановорудных эпох, как глобальных, так и региональных, находит своё отражение в количественных параметрах *Ha* магнитного поля. Более того, использование подобных данных по палеомагнетизму позволяет отойти от чисто регистрационного подхода к выделению металлогенических эпох и предсказать их. Существуют недоизученные возрастные интервалы (таблица), в пределах которых можно ожидать открытия новых месторождений: например, 330–310 млн лет (судетская фаза складчатости), граница нижнего и среднего неопротерозоя 860–800 млн лет (янцзы фаза), верхний мезопротерозой 1250–1100 млн лет (фазы ракланская, сибая), средний мезопротерозой 1400–1300 млн лет (фазы кибарская, мадейра) [15, с. 412–413]. Эпоха 330–310 млн лет может быть урановорудной, например, в Калмаккольской палеорифтовой структуре, в южном обрамлении Северо-Казахстанской урановорудной провинции, да и в самих выявленных в провинции урановых месторождениях с возрастом главных рудных стадий 410 и 360 млн лет. В то же время в Кодаро-Удоканском нижнепротерозойском палеорифте отмечается этап переотложения урана.

Прогнозируемая эпоха 860–800 млн лет, фиксирующая распад Родинии, а также предшествовавшие этой эпохе стадии активизации в мезо- и неопротерозое, наиболее ярко могут проявить себя в юго-западной и южной зонах Сибирской платформы и её складчатого обрамления.

На Енисейском краже золото-урановое стратиформное осадочно-метаморфогенное оруденение

в зонах докембрийских ССН (Кутукасская рудная зона) может иметь возраст 1050–950 млн лет, а основная эпоха формирования уранового оруденения в Верхневороговском и Уволожском грабен-синклинариях, выполненных красноцветно-пестроцветными молласоидами, 750–680 млн лет. В близкий интервал вписывается внешняя зона Байкало-Патомской области с гранит-порфирами язовского комплекса 730 ± 97 млн лет. Нельзя исключать значимости неопротерозойского омоложения уранового оруденения в Аkitжанском тектоногене (Безымянско-Домугдинский рудный узел) [11]. В Учуро-Майской впадине Алданского щита известны вулкано-плутонические зоны с ураноносными карбонатитами в Ингилийском и Арбарастахском массивах с возрастом 761 ± 18 млн лет [6]. Эпоха активного распада Родинии проявляет себя в активизации в пределах Нечеро-Ничотского урановорудного района в северо-западной части Чарского поднятия [12] и, возможно, в ураноносности фундамента важнейшего для России мезозойского урановорудного региона — Восточного Забайкалья. В пределах Стрельцовского узла известны высоко-радиоактивные граниты бухотуйского комплекса R_3b (784 ± 10 млн лет, Rb-Sr изохрона, 792 ± 12 млн лет, U-Pb, SHRIMP — ЦИИ ВСЕГЕИ) [13]. Бухотуйские граниты представлены палингенными выплавками по субстрату гранитоидов урулюнгуевского комплекса $R_{2,3}$ (1000 млн лет). Как показано Г. А. Шатковым [18], риолиты Стрельцовской ВТС с возрастом 140 млн лет рассматриваются как прямой источник уранового оруденения. Но спайдеграммы редких земель этих риолитов K_1 и гранитов бухотуйского комплекса с возрастом ~ 800 млн лет полностью идентичны, что позволяет говорить о R_3b гранитах как о высокоспециализированном первоисточнике риолитов и уранового оруденения K_1 в Стрельцовском рудном узле.

Таким образом, интерпретация кривой *Ha* магнитного поля указывает в частности на недоизученность ураноносности верхнего рифея (неопротерозоя) в южных краевых частях Сибирской платформы и её обрамления.

В экстремальных значениях *Ha* магнитного поля (эпохи минимумов и максимумов) отражены основные региональные предпосылки уранового рудообразования как продуктов неоднократно активизированных в разнотипных геолого-структурных обстановках длительно формировавшихся гранито-гнейсовых купольных структур двух главных генераций — архейско-раннепротерозойской и предрифейской [2]. Поскольку активизация может быть не только тектоно-магматической, но и без яркого проявления магматизма (тектонической), а глубинные энергетические импульсы накладываться без длительной паузы тектонического покоя, наиболее адекватным, характеризующим главное геодинамическое состояние, формирующее урановорудные эпохи, представляется термин «реювенация» (омоложение). Минерагеническая реювенация в данном случае понимается не в узком смысле, как наложенные высокотемпературных парагенезисов на низкотемпературные, а в широком — возобновление условий минералообразования, использующее накопленные геохимические и рудные ресурсы предшествовавших эпох [16].

Автономность реювенации связана с механизмом возбуждения мантии и ядра. Механизм обусловлен эксцентричностью твёрдого ядра от-

**Сопоставление эмпирически установленных урановорудных эпох
с интервалами времени градиентов *Ha* магнитного поля**

Эпохи, млн лет по шкале <i>Ha</i>	Примеры урановых месторождений, рудных районов, провинций, сформированных в данный временной интервал
40–0	Инкай, Мынкудук, Буденовское, Уванас (Чу-Сарысуйский бассейн), Учкудук, Букинай, Сугралы (Кызылкум), Харасан, Карамурун, Ирколь (Сырдарьинский бассейн), Сулуचेкинское (Чу-Илийский бассейн), Хиагда, Намару, Шегловское (Витимский район), Далматовское, Хохловское, Добровольное (Зауральский район), Меловое (Мангышлак), Раковское (Сихотэ-Алинь), Янранайское (Чукотка), Бык, Бештау (С. Кавказ), Кёнигштайн, Хамр (Северобогемский бассейн), Бихор (Карпаты), Мечек (Паннонский бассейн), Харат, Хайрхан, Нарс (ЮВ Гоби), Йилирри (З. Австралия), Мудуг (Сомали), Лангер-Хейнрих (Намибия), Родольфо, Ла-Маренита (Сьерра-Пампа, Бразилия)
85–55	Ю. Китай, Ласточка (Буреинский массив), Бутугычаг (Охотский массив), постсбросовые руды плато Колорадо, Посус-ди-Калдас (Бразилия)
185–125	Стрельцовское, Антей, Аргунское, Тулукуевское, Дорнот, Гурванбулаг, (Монголо-Приаргунская провинция), Элькон, Зона Южная, Курунг (Центрально-Алданская провинция), Семизбай (С. Казахстан), Далматовское, Малиновское (Чулымно-Енисейский прогиб), угленосные впадины Прибалхашья (Нижеилийское, Кольджат), Вандея, Морбиан, Лимузен, Басс-Марш (Франция), Мынкучур, Талды, Сяншань, Шэнюань, Куинлонг, Дуолун (Китай), Натра, Чудановица (В. Карпаты), Амброзия-Лейк, Маунт-Тейлор, Смит-Лейк (плато Колорадо)
240–200	Туракавак (С. Тянь-Шань), Урало-Тургайская обл., Донское (Урал), Джильское (Киргизия), Арли, Акута, Афасто, Имарурен (Мали – Нигер), Новацца, Валь-Рендена (Италия), Сайма (Ляодун, Китай)
280–250	Шлема-Альберода, Яхимов, Пршибрам, Рожна, Олши (Франко-Чешский массив), Лимузен, Буа-Нуар (Франция), Сьерра Пинтада, Серро-Соло, Саньогаста (Аргентина), Фигейра (Бразилия)
330–310	Будущие объекты
410–360	Грачевское, Маныбай, Заозерное, Восток, Ишимское, Молодежное, Шат, Глубинное (Северо-Казахстанская провинция), Приморское, Оглахтинское (Алтае-Саянская провинция)
520–440	Россинг (Намибия), Итатая, Эспиньярас, Санта Квирерия (Бразилия), Шинколобве (Конго)
750–680	Будущие объекты
860–800	Будущие объекты
1050–950	Илимауссак (Гренландия)
1250–1100	Будущие объекты. Этап переотложения в месторождениях несогласия Атабаска
1400–1300	Будущие объекты. Этап переотложения в месторождениях несогласия (Атабаска), Киггавик (Телон, Канада)
1670–1450	Мак-Артур Ривер, Сигар-Лейк (Атабаска), Джабилука, Кунгарра, Набарлек (С. Австралия), Олимпик-Дам (Ю. Австралия), Лагоа-Реал (Бразилия), Радиум-Хилл, Мери-Кетлин (Австралия), Карку (Приладожье), Ансах, Столбовое (В. Саян)
1770–1720	Средняя Падма, Космозеро (Заонежье), Гуннар, Эйс, Фэй (Биверлодж, Канада), Рейнджер (С. Австралия)
1900–1800	Биверлодж (Канада), Окло, Мунана (Габон), Палабора (Ю. Африка), Рам-Джангл (Австралия), Арьеплуг-Арвидсьяур (Швеция), Нуоттиярви (Финляндия), Этырко (Чинейский массив), Кавлинское (В. Сибирь) Желтореченское, Первомайское, Вагутинское, Новокоптягинское (Украина), Лагоа-Реал (Бразилия), Джадугуда (Индия)
2500–2200	Витватерсранд (ЮАР), Блайнд-Ривер, Эллиот-Лейк (Канада), Сьерра-ди-Жакобина, Железородный Четырехугольник (Бразилия), Чикмагалур (Индия)

носителем мантии и несферичностью всех глубинных оболочек [3]. Смещение центра тяжести относительно геометрического центра Земли свидетельствует, что планета не является уравновешенным гироскопом и потому обладает повышенным спектром собственных колебаний. Это увеличивает возможность разного рода резонансов в процессах саморегуляции и возникновения энергетических импульсов.

Для уранового рудообразования в одинаковой мере неблагоприятна как обстановка интенсивного сжатия (складчатости), так и ярко выраженного растяжения (спрединг). Из двух основных типов деформаций – линейно-складчатых и глыбовых (сводово-глыбовых) – урановое орудение генети-

чески связано со сводово-глыбовым типом деформаций.

Такой тип обстановки, сформировавший впервые в истории Земли крупномасштабное урановое орудение, был реализован в краевой части архейского нуклеара Южно-Африканского кратона в раннем протерозое (2500–2200 млн лет). Здесь сводово-глыбовое поднятие на ещё достаточно тонкой силической коре активизировало в протоорогенной впадине Витватерсранда концентрирование уранинита при механической миграции с образованием конгломератов в палеорулах небольших, но многочисленных речных долин. Подобная обстановка в раннепротерозойских отложениях верхнего структурного яруса древних платформ известна также

в районах Блайнд-Ривер (Канада), США в штатах Вайоминг и Южная Дакота, Бразилии, в Экваториальной Африке (Габон), Австралии, Финляндии. Из 19 районов развития конгломератов на границе архея и протерозоя 10 несут промышленную минерализацию Au и U. Как отмечает М. В. Шумилин, этот гигантский начальный «депозит» урана не мог не оказать влияния на всю последующую историю урановой металлогении [19, с. 107].

Позднее сводово-глыбовые поднятия многократно проявили себя в предрифейской генерации купольных структур, существовавших в условиях уже мощной и петрохимически зрелой коры. В пострифейское время мощность сиалической коры изменилась несущественно, но её структура была обновлена, преобразована и реорганизована. Степень её реювенации определяется наличием повторных стадий тектоно-магматической активизации — главного геодинамического явления в урановой металлогении.

Поскольку основное масштабное урановое оруденение генетически связано не с периодами коллизии или аккреции, имеющими свое определённое место в схеме идеализированной цикличности эволюции литосферы (известной как циклы Вилсона), а со сводово-глыбовым типом деформаций, маркирующих эпохи реювенации, то становится понятным возникновение сложностей в металлогеническом прогнозе при использовании парадигм цикличности. Связь с глыбовыми деформациями объясняет факт существования предпочтительных мест локализации крупных эндогенных урановых месторождений, каковыми являются области сочленения гранито-гнейсовых куполов и внутрикратонных или приразломных прогибов.

Строгое подчинение рудогенеза известным циклам и стадиям развития литосферы (будь то в модели Ю. А. Билибина или Д. Вилсона) ограничено формированием преимущественно многочисленных мелких месторождений.

Основные эпохи уранового рудогенеза связаны с таким уровнем H_a магнитного поля, который наиболее резко отстоит от среднего значения как в сторону максимума, так и в сторону минимума. Ранг металлогенической эпохи (глобальный или региональный) можно оценивать по уровню градиента H_a .

Самый существенный вклад в формирование урановорудного потенциала Земли внесли три градиента H_a , три переломных момента в её истории — на границе палео- и мезопротерозоя ~1800, в начале мезозоя ~250, в начале кайнозоя ~50 млн лет, позволяющие выделить четыре крупных периода формирования и трансформации континентальной гранитно-метаморфической коры (млн лет): 2700–1800 — формирование фундамента древних платформ, 1800–250 — молодых платформ, 250–50 — новейших платформ, 50–0 — кайнозойская активизация всех предшествовавших образований платформ и складчатых областей.

В современной металлогении укоренилось представление об эпохах складчатости как о главных реперах геодинамического развития. Но сами по себе складчатые деформации — лишь частное проявление более глобально значимого для рудогенеза процесса, в результате которого формируются платформы. Именно платформы представляют главным структурным элементом континентальной земной коры, контролирующим глобальное распределение

урановой минерализации. Жизнь складчатых областей — лишь переходный этап их превращения в кристаллический фундамент платформ, нарастающий и преобразующий континентальную кору.

Эмпирическое подтверждение металлогенической значимости указанных четырех периодов преобразования континентальной коры — распределение мировых ресурсов урана, обобщенных М. В. Шумилиным [19, с. 95]. График накопления в геологическом времени ресурсов урана (включая добытые) делится на четыре основных периода, разделённых точками переломов — 1800, 250, 50 млн лет. Вклад выявленных запасов урана древней архей-палеопротерозойской коры (2700–1800 млн лет) — 9 %, периода формирования континентальной коры молодых платформ от верхов палеопротерозоя до мезозоя (1800–250 млн лет) — 51 %, коры новейших платформ — 40 %, причём половина мезозойского прироста приходится на кайнозойскую сводово-глыбовую реювенацию (< 50 млн лет).

Если удельный прирост запасов урана за единицу времени в архее и палеопротерозое (2800–1800 млн лет) принять за единицу, то в последовательности четырёх периодов формирования фундаментов платформ запасы урана будут соотноситься друг с другом в пропорции 1–3–11–44.

На разнотипные месторождения мезо-кайнозойского возраста [8] приходится 70 % современной добычи урана. Подобная тенденция роста ресурсной базы присуща не только урану. По данным [17], более 60 % всех крупных и сверхкрупных месторождений различных полезных ископаемых мира сосредоточено в мезо-кайнозое.

С учётом уменьшения энергетики (уровней H_a) геологических процессов от древних эпох к молодым (рис. 2) можно отметить яркую тенденцию повышения коэффициента полезного действия энергетического потенциала, свидетельствующего о прогрессивной эволюции процессов рудогенеза, что связывается с вовлечением с помощью механизмов реювенации геохимических и рудных ресурсов, накопленных в предшествовавшие эпохи. Подобные факты позволяют присоединиться к выводам [19] о работе механизма по «перекачке» ресурсов из древних месторождений в молодые. Процессы рассеяния при разрушении древних объектов с избытком компенсируются процессами концентрации в виде вновь образованных месторождений.

С каждым из платформенных суперпериодов связаны специфические генетические группы урановых месторождений. Яркая особенность периода формирования фундамента древних платформ — ураноносные кварцево-галечные конгломераты, специфичность периода начала формирования фундамента молодых платформ — месторождения типа несогласия и брекчиевый тип Олимпик-Дам, мезозой выделяется расцветом жильно-штокверковых месторождений, кайнозой отличается гигантскими гидрогенными месторождениями роллового и палеодолинного типов, в неоген-четвертичную эпоху появляются месторождения калькрегетового типа. Смена генетических типов уранового оруденения обусловлена эволюцией биосферы, преобразованием состава гидросферы и атмосферы, степенью насыщенности осадочных пород углеродистым веществом и изменением доли кристаллизационно связанной воды в магматических породах.

Принимая во внимание выявленную роль H_a магнитного поля как эффективного маркера глав-

ных временных интервалов, отделяющих специфические формы минерализации, и как количественного показателя потенциальной значимости проявления уранового рудогенеза в различных интервалах геологического времени, можно предложить новую уточненную формулировку понятия «металлогеническая эпоха»:

Металлогеническая эпоха – наиболее продуктивный промежуток времени рудогенеза, подготовленный длительной предысторией накопления геохимических и рудных ресурсов, фиксируемый проявлением наибольших импульсов внутренней энергии Земли, отражённых в градиентах *Ha* магнитного поля.

Исходя из данного определения металлогенической эпохи, необходимым условием её существования является предшествующая история накопления геохимических и рудных ресурсов. Существующая стратегия регионального металлогенического анализа основана на выделении типизированных геодинамических обстановок, каждой из них присуща своя специфическая рудоносность. Прогнозирование осуществляется по принципу аналогии: от геодинамического аналога к металлогеническому прогнозу. Между тем известно, что никакая аналогия не может ничего доказывать. Предложенное понимание сущности металлогенической эпохи предполагает другую стратегию прогнозных исследований, основанную на геолого-исторической реконструкции преобразований континентальной земной коры с целью выявления ресурсной обеспеченности рудным элементом разных стадий геодинамической эволюции. Речь идет о необходимости при выделении рудных эпох учёта предшествовавшего формирования геохимически специализированных геологических формаций и возможности их преобразований в ходе наложенных метаморфогенных, гидротермально-метасоматических и экзогенно-эпигенетических процессов.

Руководящий принцип геодинамической аналогии в металлогеническом анализе следует дополнить геохимическим следствием физико-химического закона действующих масс – принципом взаимосвязи рассеянных и концентрированных форм нахождения элементов в земной коре, что открывает путь к количественной конкретизации прогнозных построений, включая и предсказание возможного качества руд.

Выводы. В ходе геологической эволюции *Ha* магнитного поля Земли фиксирует энергетические затраты планеты. Вариации величины *Ha* отражают суммарный энергетический эффект циклических изменений, связанных с ротационным режимом, и наложенных мощных импульсов, обусловленных внутренними процессами в ядре и мантии. Энергетическая основа магнитного поля позволяет использовать величину *Ha* в качестве обобщенного индикатора интенсивности миграции химических элементов, что и определяет возможность формирования месторождений.

Предложенное уточнённое понятие сущности металлогенической эпохи акцентирует внимание на длительной предыстории накопления геохимических и рудных ресурсов, формирования масштабного и концентрированного оруденения. Для оценки реальной значимости эпохи на данной конкретной территории требуется корректировка методологии металлогенического анализа. Прогнозирование, ос-

нованное на выделении специфической геодинамической обстановки эпохи рудогенеза, должно быть дополнено геолого-исторической реконструкцией предшествовавших преобразований геохимических и рудных ресурсов исследуемого участка литосферы.

Урановый рудогенез лишь частично подчиняется классическим моделям геодинамической цикличности. В рамках циклов Ю. А. Билибина или Д. Вилсона формируются преимущественно мелкие и средние месторождения. Основной региональной предпосылкой формирования рудных эпох с наличием крупных месторождений являются не сами по себе эпохи циклических преобразований континентов или океанов, а импульсы дополнительно наложенных на складчатые системы и платформенные структуры активизационных явлений, выраженных сводово-глыбовым тектогенезом, рассеянным рифтогенезом или формированием крупных магматических провинций. В ходе таких дополнительных энергетических стимулов происходит реювенация ранее сформированных геохимических и рудных ресурсов.

1. *Аплонов С.В., Титов К.В.* Геофизика для геологов. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – 248 с.
2. *Афанасьев Г.В., Миронов Ю.Б.* Уран в купольных структурах земной коры. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – 360 с.
3. *Баркин Ю.В.* Объяснение эндогенной активности планет и спутников и её цикличности // Известия наук о Земле РАЕН. 2002. Вып. 9. – С. 45–97.
4. *Билибин Ю.А.* Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. – М.: Госгеолтехиздат, 1955. – 88 с.
5. Геологический словарь. 3-е издание. В трех томах / гл. ред. О. В. Петров. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2011. Т. 2. – 476 с.
6. *Горошко М.В., Чекалицев Н.К.* Геологические предпосылки выявления урановых месторождений типа несогласия в юго-восточной части Сибирской платформы // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов: Информ. сб. – М., 2000. Вып. 141. – С. 28–33.
7. *Григорьев Г.А., Карпунин А.М.* Латеральные ряды экзогенной урановой минерализации // ДАН СССР. 1979. Т. 245. № 3. – С. 713–715
8. *Живов В.Л., Бойцов А.В., Шумилин М.В.* Уран. Геология, добыча, экономика. – М.: Атомредметзолото, 2012. – С. 301.
9. *Карпунин А.М., Миронов Ю.Б., Бузовкин С.В., Соболев Н.Н.* Эпохи уранового седиментогенеза черносланцевого типа в осадочных бассейнах Земли // Отечеств. геология. 2012. № 1. – С. 18–28.
10. *Лебедев Б.А., Пинский Э.М.* Механизмы формирования эпигенетических месторождений и их эволюция в истории Земли // Отечеств. геология. 2000. № 2. – С. 13–17.
11. *Леденёва Н.В., Курбатов А.В.* Структурное положение и рудно-формационные особенности уранового оруденения в Ачитканском потенциально урановорудном районе // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов: Информ. сб. – М., 2011. Вып. 156. – С. 116–135.
12. *Макарьев Л.Б.* Нечеро-Ничатский урановорудный район (ведущие типы оруденения, обстановки локализации и перспективы) / Л.Б. Макарьев, Л.В. Былинская, М.В. Павлов, В.В. Павшуков, И.А. Мальков // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов: Информ. сб. – М., 2006. Вып. 150. – С. 5–17.
13. *Павлова В.В., Грознова Т.Н., Лейкум М.С.* и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Серия Приаргунская. Лист М-50-XXII (Забайкальск). Объясн. зап. – СПб., 2001. – С. 111.

14. Печерский Д.М. Поведение палеоинтенсивности и других характеристик палеомагнитного поля в неогее // Геоматнеззм и аэрономза. 1998. Т. 38. № 4. – С. 180–189.
15. Планета Земля. Т. 1: Тектоника и геодинамика / Л.И. Красный (ред.) и др. 2004. – 651 с.
16. Рундквист Д.В. Эпохи реювенации докембрийской коры и их минерогеническое значение // Геология рудных месторождений. 1993. Т. 35. № 6. – С. 467–480.
17. Ткачев А.В., Рундквист Д.В. Эволюция формационно-генетических типов крупномасштабных месторождений минерального сырья и видового разнообразия полезных ископаемых в них как отражение тенденций развития глобальной металлогении // Наука и просвещение. К 250-летию Геологического музея РАН. – М.: Наука, 2009. – С. 209–284.
18. Шатков Г.А., Бутаков П.М. Геолого-геохимические критерии прогнозирования месторождений стрельцовского типа // Уран: геология, ресурсы, производство. – М., 2013. – С. 360–371.
19. Шумилин М.В. Историческая металлогения урана (опыт глобального анализа). – Иркутск, 2015. – 255 с.
20. Glossary of geology. 5th ed. / Ed. by Neuendorf K.K.E., Mehl J.P.Jr. and Jackson J.A. – Alexandria, Virginia: American Geological Institute, 2005. – 800 p.
21. Wilkinson B.H., Kesler S.E. Quantitative Identification of Metallogenic Epochs and Provinces: Application to Phanerozoic Porphyry Copper Deposits // Economic Geology. 2009. Vol. 104. No 5. – P. 607–622.
22. <http://www.noaa.gov/GlobalPaleomagneticDatabase>
1. Aplonov S.V., Titov K.V. Geofizika dlya geologov [Geophysics for Geologists]. St. Petersburg: St. Petersburg State University Printing House. 2012. 248 p.
2. Afanasiev G.V., Mironov Y.B. Uran v kupol'nyh strukturah zemnoj kory [Uranium in dome structures of Earth crust]. St. Petersburg: VSEGEI. 2010. 360 p.
3. Barkin Yu.V. Explanation of endogenous activity of planets and satellites and its cyclicity. *Proceedings of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences*. Moscow: VINITI. 2002. Iss. 9, pp. 45–97 (In Russian).
4. Bilibin Yu.A. Metallogenicheskie provincii i metallogenicheskie ehposhi [Metallogenic Provinces and Metallogenic Epochs]. Moscow: Gosgeoltehzdat. 1955. 88 p.
5. Geologicheskij slovar' [Geological Dictionary]. Chief editor O.V. Petrov. St. Petersburg: VSEGEI. 2011. Vol. 2, 476 p.
6. Goroshko M.V., Chekantsev N.K. Geological background for identifying unconformity-type uranium deposits in the southeastern part of the Siberian platform. *Informative Collection of Data on Geology of Uranium, Rare and Rare Earth Metal Deposits*. Moscow, 2000. Iss. 141, pp. 28–33 (In Russian).
7. Grigoriev G.A., Karpunin A.M. Lateral series of exogenous uranium mineralization. *Proceedings of USSR Academy of Sciences*. 1979. Vol. 245. No 3, pp. 713–715 (In Russian).
8. Zhivov V.L., Boitsov A.V., Shumilin M.V. Uran. Geologiya, dobycha, ehkonomika [Uranium. Geology, Mining, Economy]. Moscow: Atomredmedzoloto. 2012. 301 p.
9. Karpunin A.M., Mironov Yu.B., Buzovkin S.V., Sobolev N.N. Epochs of black-shale type uranium sedimentogenesis in sedimentary basins of the Earth. *Otechestvennaya geologiya*. 2012. No 1, pp. 18–28 (In Russian).
10. Lebedev B.A., Pinsky E.M. Formation mechanisms of epigenetic deposits and their evolution in the history of the Earth. *Otechestvennaya geologiya*. 2000. No 2, pp. 13–17 (In Russian).
11. Ledeneva N.V., Kurbatov A.V. Structural position and ore-formation features of uranium mineralization in the Akitkan potentially uranium ore district. *Informative Collection of Data on Geology of Uranium, Rare and Rare Earth Metal Deposits*. Moscow: 2011. Iss. 156, pp. 116–135 (In Russian).
12. Makar'ev L.B., Bylinskaya L.V., Pavlov M.V., Pavshukov V.V., Malkov I.A. Nechero-Nichatka uranium ore district: Major types of mineralization, localization environment and prospects. *Informative Collection of Data on Geology of Uranium, Rare and Rare Earth Metal Deposits*. Moscow: 2006. Iss. 150, pp. 5–17 (In Russian).
13. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1 : 200 000. Seriya Priargunskaya. List M-50-XXII (Zabajkal'sk). Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation, scale of 1 : 200,000. Argun Series. Sheet M-50-XXII (Zabaikalsk). Explanatory notes]. Pavlova V.V., Groznova T.N., Leykum M.S. et al. St. Petersburg. 2001. 111 p.
14. Pechersky D.M. Behaviour of paleointensity and other characteristics of the paleomagnetic field during the Neogene. *Geomagnetizm i aehronomiya*. 1998. Vol. 38. No 4, pp. 180–189 (In Russian).
15. Planeta Zemlya: Tektonika i geodinamika [Planet Earth: Tectonics and Geodynamics] / L.I. Krasny (ed.) et al. St. Petersburg. 2004. Vol. 1, 651 p.
16. Rundkvist D.V. Precambrian crust rejuvenation epochs and their mineragenic value. *Geologiya rudnyh mestorozhdenij*. 1993. Vol. 35, No 6, pp. 467–480 (In Russian).
17. Tkachev A.V., Rundkvist D.V. Evolution of formation-genetic types of large-scale mineral deposits and species diversity of minerals in them as a reflection of global tendencies in the development of global metallogeny. *Science and Education. To the 250th Anniversary of the RAS Geological Museum*. Moscow: Nauka. 2009, pp. 209–284 (In Russian).
18. Shatkov G.A., Butakov P.M. Geological and geochemical criteria of forecasting Streltsovsky-type deposits. *Uranium: Geology, Resources, Production*. Moscow. 2013, pp. 360–371 (In Russian).
19. Shumilin M.V. Istoricheskaya metallogeniya urana: opyt global'nogo analiza [Historical Uranium Metallogeny: Experience of Global Analysis]. Irkutsk. 2015, pp. 255.
20. Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P.Jr. and Jackson, J.A. 2005: Glossary of geology. American Geological Institute. Alexandria, Virginia. 800.
21. Wilkinson, B.H., Kesler, S.E. 2009: Quantitative Identification of Metallogenic Epochs and Provinces: Application to Phanerozoic Porphyry Copper Deposits. *Economic Geology*, vol. 104, 5, 607–622.
22. <http://www.noaa.gov/GlobalPaleomagneticDatabase>

Пинский Эдуард Маркович – доктор геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ ¹. <Eduard_Pinsky@vsegei.ru>
 Миронов Юрий Борисович – доктор геол.-минер. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ ¹. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>
 Афанасьев Георгий Владимирович – доктор геол.-минер. наук, консультант, ВСЕГЕИ ¹. <ogumr@vsegei.ru>

Eduard Pinsky – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI ¹. <Eduard_Pinsky@vsegei.ru>
 Yuri Mironov – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department of uranium geology and radioecology, VSEGEI ¹. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>
 Georgy Afanasyev – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, the adviser VSEGEI ¹. <ogumr@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.
 A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74, Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.