

производственному циклу: геологоразведка, проектирование, строительство рудников и добыча с тем, чтобы выбывающие мощности компенсировались новыми рудниками. За прошедшие 7 лет производство Ураниум Уан выросло почти в 5 раз (с 1102 т в 2008 г. до 4919 т в 2016 г.), что позволило выйти на четвертое место в мире среди урановых компаний. Разведанная сырьевая база и планируемые производственные мощности способны обеспечить дальнейший рост при благоприятных рыночных ценах. Ресурсная база за 4 года увеличилась в 1,4 раза.

С целью восполнения и развития сырьевой базы Ураниум Уан осуществляет геологоразведку как в уже определенных урановорудных районах и зонах своего присутствия, так и в новых странах. Приоритетным направлением могло бы стать сотрудничество с НАК Казатомпромом в области поиска новых месторождений для подземного выщелачивания урана. При этом будет использован уникальный опыт советской и российской школ урановой геологии, приведший к созданию крупнейшей в мире сырьевой базы урана.

ЛИТЕРАТУРА

1. *The Nuclear Fuel Report. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2015–2035.* World Nuclear Association, September 2015.
2. *URANIUM 2016: Resources, Production and Demand.* A joint report by the NEA and IAEA, OECD 2016.
3. Живов, В.Л. Уран: геология, добыча, экономика / В.Л. Живов, А.В. Бойцов, М.В. Шумилин. — М.: РИС «ВИМС», 2012.

© Бойцов А.В., 2017

Бойцов Александр Владимирович // boytsovav@u1h.com

УДК 550.812:553.04+553.495(470)

**Машковцев Г.А., Алтунин О.В., Гребенкин Н.А.,
Коротков В.В., Овсянникова Т.М., Ржевская А.К.
(ФГБУ «ВИМС»)**

ПЕРВООЧЕРЕДНЫЕ ЗАДАЧИ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА УРАН

*Рассмотрены приоритетные направления воспроизводства и расширения минерально-сырьевой базы урана атомной отрасли России. В рамках проблемы представлены перспективные провинции, районы и конкретные геологоразведочные объекты, требующие проведения прогнозно-тематических, прогнозно-минерагенических и поисковых работ соответственно. Освещены современные эффективные геолого-геофизические и геохимические методы поисков и оценки месторождений урана, на базе которых для потенциально рудоносных территорий представляется возможным сформировать рациональные прогнозно-поисковые комплексы с предварительной апробацией их на объектах-эталонах. **Ключевые слова:** минерально-сырьевая база, уран, объекты ГРП, методы поисков, прогнозно-поисковые комплексы.*

Mashkovtsev G.A., Altunin O.V., Grebenkin N.A., Korotkov V.V., Ovsyannikova T.M., Rzhevskaya A.K. (VIMS)

PRIORITY TASKS AND MODERN TECHNOLOGIES OF URANIUM EXPLORATION

*The article deal with priority directions of reproduction and expansion of the uranium mineral resource base of the Russian nuclear industry. Within the framework of the problem, promising provinces, regions and specific exploration facilities are presented, which require forecast-thematic, prognostic-mineragenic and prospecting works, respectively. The modern effective geological, geophysical and geochemical methods for prospecting and assessing uranium deposits are covered, on the basis of which for potentially ore-bearing territories it is possible to form rational prognostic-search complexes with preliminary approbation of them at reference facilities. **Keywords:** mineral resources base, uranium, exploration targets, exploration technique, prospecting complexes.*

Мировая энергетика по-прежнему остается одним из главнейших факторов экономического развития человечества. Однако в последние десятилетия не утихают дискуссии об основных направлениях ее дальнейшего совершенствования и расширения в связи с Парижским соглашением о снижении выбросов углекислого газа в атмосферу, постепенным ростом мощностей возобновляющихся источников (ВИЭ), авариями на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима и т.д. В наши дни и на перспективу атомная энергетика играет и будет играть важную роль в энергопроизводстве как в мире в целом (16 % от всего годового объема вырабатываемой электроэнергии), так и в экономически развитых странах — во Франции (до 75 %), Украине (46 %), Швеции (38 %), Финляндии (33 %), США (19 %), Великобритании (18 %), России (17 %), Канаде (15 %) и др. Для снижения экологических рисков от деятельности АЭС и получения дополнительных источников ядерного топлива (ЯТ) в последние годы динамично разрабатываются технологии переработки ядерных отходов (ОЯТ), всесторонне и активно обсуждаемые на последнем форуме «АТОМЭКСПО 2017» в г. Москва. Создаются также реакторы на быстрых нейтронах (БН), обеспечивающие замкнутый характер работы ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и использующие в качестве топлива ОЯТ, смешанное оксидное уран-плутониевое топливо, торий и др. Однако эти технологии будут введены в производство через десятилетия. В современный период развитие мировой атомной энергетике (АЭ) базируется на строительстве и использовании тепловых реакторов, срок деятельности которых составляет 50–60 лет. Каковы же перспективы развития АЭ, ожидаемое количество ядерных блоков и, конечно, требуемое количество природного урана в настоящее время и на перспективу?

В настоящее время в мире действует 437 тепловых реакторов, потребляющих порядка 60 тыс. т природного урана в год, что близко к его годовому производству. В связи со стагнацией уранового рынка, вызванной фукусимской аварией, временной остановкой

АЭС в Японии, превышением производства над потреблением, сокращением парка ядерных блоков в Германии и в некоторых других странах, цены на сырье существенно снизились (до 105 долл. США/кг), что в свою очередь обусловило активную разработку месторождений с низкой себестоимостью — главным образом типа «несогласия» (Канада), песчаникового типа (Казахстан) и гематитовых брекчий с комплексными рудами (Австралия). Значительную роль в обеспечении деятельности АЭС дешевым топливом играют вторичные ресурсы. Однако по оценкам некоторых ведущих информационно-аналитических компаний уже после 2023–2024 гг. спрос на уран начнет существенно превышать предложение, и к 2030 г. его дефицит достигнет 20 тыс. т. При этом будут сработаны складские запасы и вторичные ресурсы, ситуация на рынке изменится в сторону увеличения цены на сырье, а значит в существенной мере активизируются геологоразведочные работы (ГРР) на уран.

В России парк ядерных реакторов, потребляющих около 4,5 тыс. т урана в год, размещается на 10 АЭС. В среднесрочной перспективе планируется построить еще 9 реакторов и к 2030 г. довести общий объем установленной мощности АЭС до 34 ГВт, что потребует порядка 7,5 тыс. т природного урана в год. Однако кроме внутреннего потребления Россия обеспечивает ядерными материалами российско-советские реакторы в других странах и осуществляет экспорт ЯТ по действующим и вновь заключенным контрактам. По оценкам отечественных и зарубежных экспертов, в том числе экспертов МАГАТЭ, потребность РФ в уране составляет от 12 до 20 тыс. т в год. К 2030 г. в связи со строительством новых АЭС в России и договоренностями о сооружении атомных станций за рубежом в первую очередь в странах Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР), потребности в природном уране могут вырасти до 25 и более тыс. т.

Минерально-сырьевое обеспечение атомной энергетики страны

Россия располагает весьма крупными запасами урана в недрах — около 720 тыс. т, а также складскими запасами и вторичными ресурсами. Однако значительная часть запасов в экономическом отношении непригодна для разработки в современных условиях предельно низких цен. Основная часть запасов находится в распределенном фонде недр — (АО «Атомредметзолото» («АРМЗ») и связана с четырьмя рудными районами — Стрельцовским в Юго-Восточном Забайкалье, Витимским в Республике Бурятия, Зауральским в Курганской области и Эльконским в Южной Якутии.

Стрельцовский район, осваиваемый ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО), включает 16 жильно-штоковерковых месторождений с общими суммарными запасами урана 104 тыс. т и средним содержанием его в рудах порядка 0,15 %. В настоящее время годовая добыча по металлу, осуществляемая подземным горным способом, составляет около 2 тыс. т. Для предотвращения существенного снижения годового производства ура-

на необходим скорейший ввод в эксплуатацию рудника № 6 (месторождения Аргунское и Жерловое), активной подготовкой которого в настоящее время занимается АО «АРМЗ» и ПАО «ППГХО». Кроме того, в пределах Стрельцовского рудного поля предприятием совместно с другими организациями проведен детальный анализ его буровой изученности и выделены локальные участки для постановки детальных поисковых работ на богатое оруденение, выявление которого может улучшить качество руд в целом по предприятию.

Витимский район включает группу малых сближенных объектов гидрогенного палеоруслового типа с общими запасами урана 41 тыс. т и прогнозными ресурсами кат. P_1+P_2 — 57 тыс. т. Месторождения района осваиваются АО «Хиагда» методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) с производительностью 500 т урана в год, которая в соответствии с проектом к 2020 г. должна достигнуть 1 тыс. т. Для обеспечения необходимого объема добычи с самой низкой в РФ себестоимостью урана предприятием создана производственная, транспортная и энергетическая инфраструктура. Однако для его устойчивой деятельности на перспективу требуется подготовка новых запасов и прогнозных ресурсов урана достоверных кат. P_1 и P_2 . С этой целью планируется разведка ряда участков с подготовкой для разработки необходимых запасов урана и реализация значительного ресурсного потенциала P_3 , достигающего более 150 тыс. т путем проведения первоочередных поисковых работ в северо-восточной части района на обширной и весьма перспективной Антасейской площади.

Зауральский район с глубиной (до 600 м) залегающими палеорусловыми гидрогенными месторождениями урана — Далматовским, Хохловским и Добровольным — содержит 17 тыс. т запасов урана со средними его содержаниями в рудах 0,037 % и незначительными прогнозными ресурсами кат. P_2 — 10 тыс. т. Район осваивается АО «Далур» способом СПВ. На сегодняшний день завершается разработка Далматовского месторождения с добычей не только урана, но и попутно извлекаемого скандия. Начато освоение Хохловского объекта, активно осуществляется подготовка месторождения Добровольное. Производительность предприятия составляет около 500 т урана в год; в дальнейшем, после завершения отработки Далматовского и ввода в освоение Добровольного месторождений планируется обеспечить тот же уровень производства или несколько его повысить — до 600–700 т в год. К сожалению, перспективы существенно расширения МСБ предприятия практически отсутствуют — к югу от Добровольного пролегает граница с Республикой Казахстан, на востоке перспективные русловые структуры залегают на глубинах 700 м и выше. На площадях, расположенных севернее и западнее района, ранее проведенные работы не дали положительного результата. Таким образом, АО «Далур» предстоит рассчитывать только на осваиваемые объекты, добываясь наиболее полно-

го извлечения урана с максимальной экономической эффективностью.

Кроме рассмотренных на территории РФ имеется крупнейший по масштабам *Эльконский урановорудный район* (запасы распределенного фонда около 360 тыс. т). Однако из-за низких концентраций урана в рудах (порядка 0,15%), наличия упорных руд и сложных горно-геологических условий освоение этого объекта в настоящее время нерентабельно и переносится на отдаленную перспективу до существенного улучшения конъюнктуры уранового рынка.

Рудные объекты в Калмыкии, представленные бедным комплексным уран-редкоземельным оруденением в костном детрите ископаемых рыб, также пока не востребованы промышленностью. По тем же экономическим причинам остается в нераспределенном фонде недр целая группа малых приповерхностных месторождений, в принципе пригодных для разработки карьерным способом с последующим кучным выщелачиванием и применением передвижных локальных сорбционных установок.

В целях покрытия дефицита уранового сырья ГК «Росатом» силами Uranium One Holding N.V. совместно с казахстанскими предприятиями осуществляет разработку способом СПВ нескольких гидрогенных урановых месторождений в Республике Казахстан. При этом российская доля годовой производительности составляет порядка 4,5 тыс. т.

Таким образом, суммарное производство урана на осваиваемых российских и казахстанских месторождениях составляет порядка 7–7,5 тыс. т в год. Дефицит сырья в настоящее время и на ближайшую перспективу покрывается складскими запасами и вторичными ресурсами. В сложившейся ситуации важнейшей задачей геологической отрасли является выявление крупных урановорудных объектов с приемлемыми параметрами руд, пригодных для создания рентабельных горно-добычных предприятий.

Перспективные ураноносные территории намечены и обоснованы главным образом в Сибири и на Дальнем Востоке. Однако в большинстве случаев ожидаемые месторождения могут иметь скрытый характер, что требует применения новых технологий ГРР.

Основные задачи геологоразведочных работ на уран на современном этапе

Исходя из сложившейся ситуации с природным ураном, необходим активный разворот геологоразведочных работ, направленных на выявление месторождений с высокотехнологичным гидрогенным оруденением песчаникового типа, пригодным для добычи методом СПВ, и жильно-штокверковых объектов с богатыми рудами, к которым относятся

ожидаемые в России месторождения в вулcano-тектонических структурах (ВТС) и в зонах древних структурно-стратиграфических несогласий (ССН).

Предшествующими исследованиями ВИМСа, ВСЕГЕИ, УРАНГЕО и других организаций обоснован и подготовлен для проведения ГРР целый ряд первоочередных площадей (Шангулежская, Бульбухтинская, Вороговская, Южно-Каменушинская, Ничатская, Аkitканская, Приобская, Антасейская, Кульдурская), которые в зависимости от степени геолого-геофизической изученности и полноты проявления критериев рудоносности выделены под поисковые работы или под региональные прогнозно-минерагенические исследования. В числе первоочередных *поисковых площадей на гидрогенное оруденение* выделены: Приобская в Новосибирской области, Антасейская в Республике Бурятия и Кульдурская в Приамурье, на *эндогенное жильно-штокверковое*: Шангулежская и Бульбухтинская в Иркутской области, Вороговская в Красноярском крае и Южно-Каменушинская в Хабаровском крае.

Для определения поисковых площадей в других ураноносных регионах необходимо проведение региональных прогнозно-минерагенических исследований на уран, охватывающих крупные таксоны ранга минерагенических районов и провинций, таких как Бурейский массив и его обрамление в Приморье, Охот-



Рис. 1. Действующие и планируемые объекты ГРР на уран: 1 — урановорудные районы; 2 — перспективные районы и провинции; 3 — площади ГРР на жильно-штокверковый (а) и песчаниковый (б) типы: 1 — Тарбалджейская, 2 — Присаянская, 3 — Вороговская, 4 — Шангулежская, 5 — Бульбухтинская, 6 — Ничатская, 7 — Каменушинская, 8 — Аkitканская, 9 — Нижне-Бурейская, 10 — Приобская, 11 — Антасейская, 12 — Кульдурская

ский, Яно-Колымский и Чукотский гранитизированные массивы Дальневосточного округа и другие обширные перспективные территории (рис. 1). В процессе прогнозно-тематических исследований характеризуются как известные, так и нетрадиционные рудно-формационные и геолого-промышленные типы ожидаемых урановородных объектов, оценивается степень изученности территории геолого-геофизическими мелко- и среднemasштабными данными. Для определившегося геолого-промышленного типа выбирается объект-эталон ранга рудного района — рудного поля, уточняются разномасштабные прогнозно-поисковые критерии и признаки, в совокупности представляющие собой геолого-прогнозную (поисковую) модель. На базе разработанной и уточненной, применительно к конкретным геоструктурам, модели выделяется площадь проведения прогнозно-минералогических работ. В частности, к одной из наиболее перспективных площадей для *региональных прогнозно-минералогических исследований*, направленных на выделение и обоснование поисковых объектов, относится Аkitканская площадь в пределах Северо-Байкальской провинции (Иркутская область). Ниже приводятся краткие сведения по действующим и планируемым объектам ГРР.

Поисковые работы на эндогенное урановое оруденение

Вороговская площадь располагается в северной части Енисейского кряжа в области сочленения докембрийского Кутукаского гранито-гнейсового купола с наложенной в результате рифейской активизации крупной Вороговской впадиной, выполненной осадочно-вулканогенными формациями. Предшествующими работами здесь выявлены малые месторождения Кедровое и Олень с бедным непромышленным урановым оруденением, связанным с телами вулканитов кислого состава, и Кутукасская группа проявлений, локализованных в углеродистых сланцах и гранито-гнейсах, специализированных на уран и редкоземельные элементы. В ассоциации с урановой минерализацией установлены повышенные концентрации золота. Кроме того, в северной части впадины в приконтактовой области с Кутукаским поднятием по данным аэропоисков выявлена обширная по площади Чернореченская группа аномалий радиоактивности, не получивших наземной заверки.

В качестве перспективной выделяется северная часть депрессионной структуры, где в зонах ССН ожидается обнаружение масштабных скрытых месторождений австралийского типа в районе недоизученной Кутукасской группы рудопроявлений и канадского типа в районе Чернореченской группы радиоактивных аномалий [5].

Шангулежская площадь располагается в пределах крупной Восточно-Саянской редкометалльной провинции, в геологическом строении которой участвуют гранито-гнейсовые формации архей-нижнепротерозойского кристаллического основания Восточно-Сибирской платформы и субплатформенные образования рифея наложенных тафро- и рифтогенных проги-

бов. Провинция включает ранее выявленные и оцененные редкометалльные месторождения — Белозиминское (Nb, TR), Большетагинское (Nb), Вишняковское, Зашихинское (Ta) и небольшие по масштабу, но с высоким качеством руд (первые проценты в штуфных пробах) жильно-штокверковые урановые месторождения Столбовое и Ансах. В 2015 г. на заключительном этапе буровых работ в пределах юго-восточного фланга месторождения Столбовое под чехлом рифейских песчаников было выявлено рудопроявление Скрытое. Оно представлено «слепыми» рудными телами мощностью от 6,5 м до первых десятков сантиметров и содержаниями урана от 0,13 до 1,48 %, подтвердившими правомерность разработанной ранее геолого-генетической модели [2].

С учетом полученных новых данных дальнейшие поиски на Шангулежской площади планируется реализовать в пределах участков с мощностью отложений средне-верхнерифейского чехла в первые сотни метров с целью выявления скрытых объектов в гранит-метаморфических комплексах фундамента и в раннерифейских молассоидах на доступных для бурения глубинах (рис. 2). Эти ГРР имеют ключевое значение для оценки ураноносности южного обрамления Восточно-Сибирской плиты и Сибирского региона в целом. Площадь ГРР располагается в пределах Бирюсинского поднятия и его склоновых частей. Основным элементом поисков являются литофицированные молассоиды раннего рифея, залегающие на специализированном гранит-метаморфическом фундаменте и интродуцированные трещинными интрузиями базитов субмеридионального и восток-северо-восточного направления, как правило трассирующих рудные зоны месторождения Столбовое. В то же время потенциально рудоносные образования раннего рифея практически не обнажаются на современной поверхности, так как значительная их часть была эродирована, а оставшиеся накопления в приразломных троговых структурах были перекрыты плащом средне-позднерифейских песчаников. Выявление этих потенциально рудоносных структурно-формационных образований, их картирование на площади ГРР, а также прослеживание разнонаправленных рудно-метасоматических зон под рифейский чехол и, главное, обнаружение связанного с ним скрытого промышленного уранового оруденения потребует сложного комплекса геолого-геофизических и специальных геохимических исследований, предваряющих горно-буровые работы.

В результате проведения поисковых работ на Шангулежской площади планируется опосредованно изучить северный и южный участки, а также оценить фланги месторождения Столбовое на предмет скрытого уранового оруденения. Положительные итоги поисков дадут мощный импульс для развития ГРР по выявлению богатых урановых руд.

Булбухтинская площадь расположена на территории Бодайбинского района Иркутской области в северо-восточной части Байкало-Патомского нагорья. В геологическом строении принимают участие

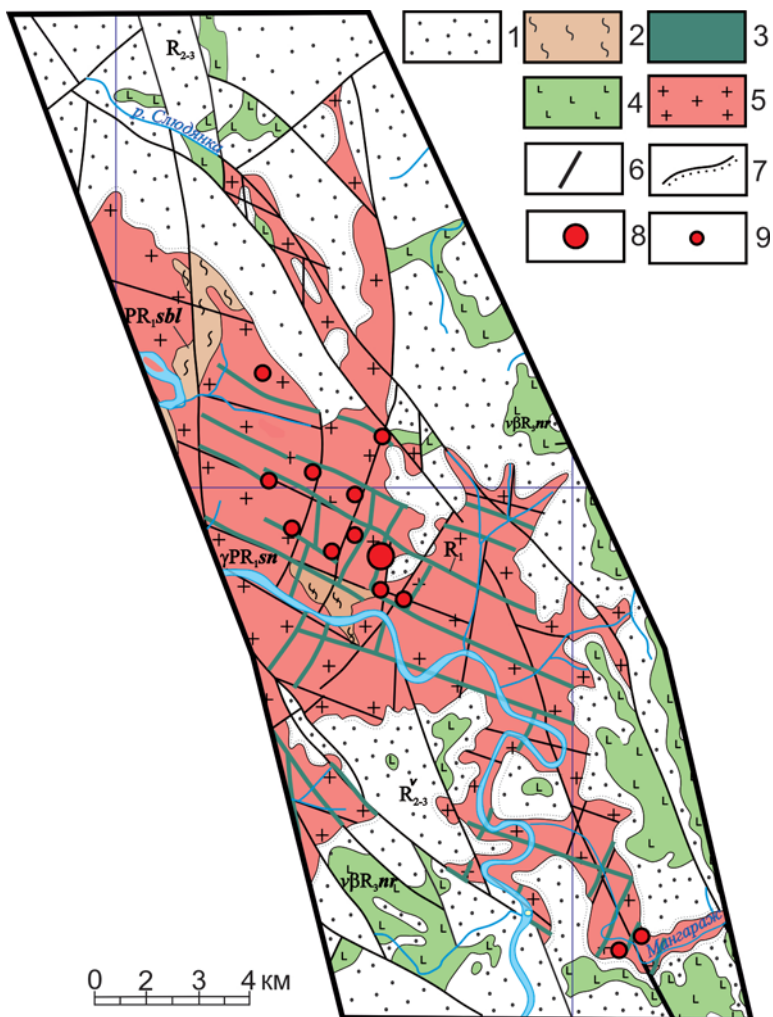


Рис. 2. Геологическая схема Шангулезской площади: 1 — песчаники (R_{2-3}); 2 — кристаллические сланцы сублукской серии (PR_{2-sbl}); 3 — дайки основного состава (R_1); 4 — силлы доллеритов нерсинского комплекса (vBR, m); 5 — гранитоиды саянского комплекса ($\gamma PR, sn$); 6 — разрывные нарушения; 7 — граница ССН; 8 — месторождение Столбовое; 9 — аномалии и проявления урана

различные гранито-гнейсовые образования и сланцы древнего кристаллического нижнепротерозойского фундамента, которые со структурно-стратиграфическим несогласием перекрыты терригенными и карбонатными отложениями рифея. В результате предшествующих ГРП была выявлена целая группа проявлений урана, а также малое месторождение Чепок с прогнозными ресурсами кат. P_1 — 10 тыс. т. Площадь включает Ченчинскую радиогеохимическую зону, протягивающуюся вдоль границы предрифейского ССН на 25 км в северо-западном направлении. Она включает месторождение Чепок, многочисленные аномалии и проявления урана — Пурпольское, Куликач, Кольцевое и др. Лишь совсем небольшая часть выявленных рудопоявлений, преимущественно имеющих выход на дневную поверхность, была опоискована на глубину бурением. В то же время последовательного и целенаправленного опоискования зоны ССН не проводилось; осталось недоизученным большое количество проявлений и аномалий, в том числе

в породах рифейского чехла. Так, рудные зоны месторождения Чепок достоверно прослежены канавами, но на глубину изучены всего тремя скважинами. Совершенно не изучались аномалии в юго-восточной части Ченчинской радиогеохимической зоны, в том числе в отложениях рифейского чехла. В связи с этим необходимость проведения ГРП на Бульбухтинской площади с целью оценки ее промышленной ураноносности является очевидной.

Южно-Каменушинская площадь располагается в пределах Буреинского гранитизированного массива, где важнейшим ураноносным таксоном является Каменушинская мезозойская ВТС с бимодальным формационным составом вулканитов (с кислыми и основными разностями). В северной ее части специализированными поисками конца 1950-х начала 1960-х годов выявлены урановые месторождения Ласточка (4,7 тыс. т запасов), малые месторождения Светлое, Эхилканское, Скальное, а также целый ряд рудопоявлений. Пологопадающие залежи с настурановым оруденением контролируются здесь зонами и участками пересечения разнонаправленных тектонических нарушений преимущественно в липаритах и сопровождаются комплексом гидротермально-метасоматических преобразований пород, включающим гидрослюдизацию, серицитизацию, альбитизацию, карбонатизацию и хлоритизацию. Ураноносность северной части Каменушинской ВТС связывается со Светлинской рудной зоной.

Технико-экономические расчеты последних лет свидетельствуют о возможной рентабельности освоения месторождения Ласточка. Важно отметить, что по комплексу структурно-формационных, морфологических, минералого-геохимических характеристик урановорудные объекты Каменушинской ВТС относятся к традиционному Стрельцовскому геолого-промышленному типу.

При хорошей опоискованности северной части Каменушинской ВТС центральная и южная части ВТС планомерно не изучались, несмотря на их значительное сходство со Светлинской зоной и, главное, со Стрельцовским рудным полем. Перспективы ураноносности центральной и южной частей ВТС связываются с крупными протяженными тектоно-метасоматическими зонами — Юримакитской, Эхилкамакитской и Перлитовой, вмещающими многочисленные слабоизученные на глубину рудопоявления и аномалии урана. Наибольшими перспективами обладает Юримакитская зона восток-северо-восточной ориентировки, вмещающая 2 рудопоявления и более 80 аномалий урана. Геологический разрез этой части ВТС имеет гетерогенное строение, обусловленное че-

редованием кислых и средних разностей пород в сочетании с покровами и субвулканическими интрузиями, залегающими на высокорadioактивных гранитах и пегматитах фундамента. Здесь же отмечаются области интенсивного проявления гидротермально-метасоматических преобразований, в том числе аргиллизит-брезитового ряда. Указанные признаки свидетельствуют о реальных перспективах выявления в пределах Юримакитской зоны масштабного уранового оруденения, скорее всего «скрытого» типа. Апробированные прогнозные ресурсы урана Каменушинской ВТС оценены по кат. P_3 — 160 тыс. т и P_2 — 28,7 тыс. т.

Прогнозно-минерогенические исследования на эндогенное урановое оруденение

При определении дефицита поисковых площадей на уран высокую актуальность приобретают региональные прогнозно-минерогенические исследования и опережающие поисковые работы, направленные на прогнозирование и выявление локальных перспективных участков. Для реализации таких работ определено несколько крупных первоочередных регионов, отвечающих рангу провинций в Сибири и на Дальнем Востоке, в т.ч. Северо-Байкальский, Учуро-Майский и Буреинский. Ниже в качестве примера приведена Аkitканская площадь, одна из наиболее перспективных в Северо-Байкальском регионе.

Аkitканская площадь. Ее основным структурно-формационным и металлогеническим таксоном является одноименный вулканический пояс, протягивающийся на 500 км в меридиональном направлении от юго-западного окончания оз. Байкал. Он сложен вулканогенно-осадочными и интрузивными средне-кислыми раннепротерозойскими породами щелочного ряда, геохимически специализированными на уран (рис. 3). Площадь вмещает более 50 проявлений урана и одно малое месторождение — Безымянное. Выявленные многочисленные объекты представлены полихронными рудами — настурном, в меньшей степени браннеритом и коффинитом, широко распространенными

в трещинно-жильных системах среди калишпатовых метасоматитов или эйситоподобных альбититов.

Концентрации урана в рудах варьируют в широком диапазоне от 0,05 до 5–10 % в штуфах. В пределах площади в пролювиальном подгорном шлейфе установлены протяженные развалы валунов и галечников с крупными гнездами неокисленного настурана (рудопоявление Каскадное и др.), что свидетельствует о близком эрозионном вскрытии и разрушении богатейших гидротермальных урановых руд.

По уникальной рудонасыщенности этой огромной территории, по многоэтапному проявлению масштабных рудообразующих процессов, связанных с гренвилльской и байкальской эпохами тектогенеза, Аkitканская площадь относится к одной из самых перспективных на уран территорий РФ. Следует отметить, что несмотря на длительную историю изучения

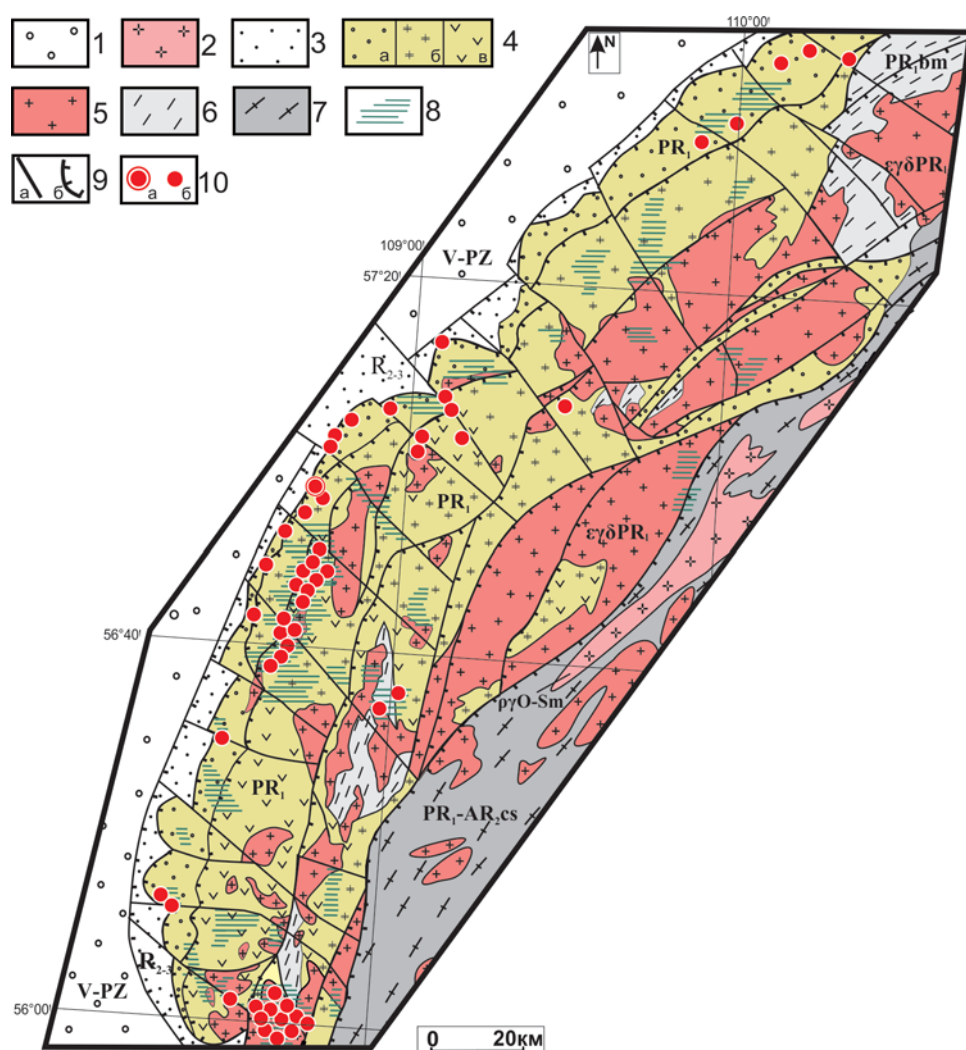


Рис. 3. Геологическая схема Аkitканской площади: 1 — карбонатные отложения плитного комплекса Сибирской платформы (V-PZ); 2 — граниты и пегматиты мамского комплекса ($r\gamma O-Sm$); 3 — терригенно-осадочные отложения (R_{2-3}); 4 — песчаники, конгломераты, туфы (а), субщелочные вулканиды кислого (б) и среднего составов (в) (PR_1); 5 — граносиениты, граниты, диориты и др. ($\epsilon\gamma\delta PR_1$); 6 — вулканогенно-осадочные образования большеминской толщи (PR_1, bm); 7 — мигматито-гнейсы (PR_1-AR_2cs); 8 — области проявления даек базитов; 9 — надвиги и взбросы (а), сдвиги и прочие разрывные нарушения (б); 10 — месторождение урана Безымянное (а) и рудопроявления (б)

территории не проводились масштабные прогнозные исследования, тем более исследования, позволяющие оценить перспективы ураноносности на глубину; работы ограничивались лишь детальными поисками на локальных участках и на рудопроявлениях. Для предварительной достоверной оценки Аkitканской площади и определения на этой основе поисковых площадей необходима постановка и реализация специализированных региональных прогнозно-минерагенических исследований (или опережающих поисков) с использованием комплекса современных технологий, в том числе позволяющих получить объемные модели перспективных рудных узлов.

Геологоразведочные работы на гидрогенное урановое оруденение

Гидрогенное направление поисков является одним из наиболее актуальных, особенно в настоящее время, в связи с низкой себестоимостью производства металла, что безусловно важно в условиях современной стагнации уранового рынка.

В России активно срабатываются запасы Зауральского и Витимского районов с гидрогенным оруденением, что вызывает острую необходимость в развитии прогнозных и поисковых работ на данный геолого-промышленный тип. В соответствии с этим в настоящее время начаты поиски гидрогенного уранового оруденения в Новосибирской области на Приобской площади, а также завершаются ГРП в Хабаровском крае. Подобный незначительный объем поисков на гидрогенном направлении явно не соответствует стратегическому значению проблемы развития минерально-сырьевого потенциала урана. В соответствии с этим необходимо планирование и реализация ГРП этого направления и в других районах — в первую очередь в Республике Бурятия и на Дальнем Востоке.

Приобская площадь. На огромном протяжении южной окраины Западно-Сибирской плиты от Енисейского кряжа до Казахстанского нагорья предшествующими ГРП на уран выявлено несколько гидрогенных рудопроявлений и малых месторождений, относящихся к двум литолого-стратиграфическим комплексам осадочной толщи и соответствующим рудообразующим эпохам: палеоген-четвертичной — Смоленское, Михайловское, Пригородное и др., и юрско-нижнемеловой — Малиновское. Объекты первой группы характеризуются незначительными масштабами и низкими концентрациями урана в связи с исключительно вялым гидродинамическим режимом подземных вод южной окраины плиты и с низкими содержаниями растворенного в них урана. Объектам второй группы свойственны более высокие концентрации урана (при среднем содержании 0,04 %, вплоть до 0,3 %) в рудах, и по комплексу признаков они являются полными аналогами промышленных объектов Зауральского района. В связи с этим наибольший поисковый интерес представляет собой Приобская площадь с ранее определившимися перспективами на древнее мезозойское оруденение в палеодолинах, что и явилось основанием для постановки начавшихся в 2017 г. ГРП (рис. 4).

Приобская площадь располагается в Новосибирской области и в геологическом отношении принадлежит южной окраине Западно-Сибирской плиты в области ее примыкания к Томь-Кольванскому поднятию Алтае-Саянской складчатой области. В строении поднятия участвует сложный комплекс гранит-метаморфических домезозойских образований, в том числе специализированных на уран гранитоидов с повышенными концентрациями урана до 7–8 г/т, которые могли служить мощным геохимическим источником для формирования экзогенно-эпигенетических (гидрогенных) объектов.

Площадь является закономерной частью протяженной (около 2 тыс. км) металлогенической зоны, включающей месторождение Малиновское и целый ряд рудопроявлений со сходным геологическим строением. В составе потенциально рудоносной осадочной толщи выделяются юрские песчано-глинисто-алевролитовые отложения, залегающие непосредственно на коре выветривания девон-карбоновых гранит-метаморфических комплексов пород. Юрские угленосные отложения перекрываются несортированными красноцветами нижнего мела, отвечающими эпохе аридизации климата — важнейшего фактора экзогенно-эпигенетического уранового рудообразования. Предшествующими работами на площади отдельными скважинами установлены несколько юрских палеодолин и редкие аномалии повышенной радиоактивности в связи с границами окисленных пород. Основной задачей опережающих поисковых работ является выделение локальных перспективных участков, заслуживающих постановки детального опoискования.

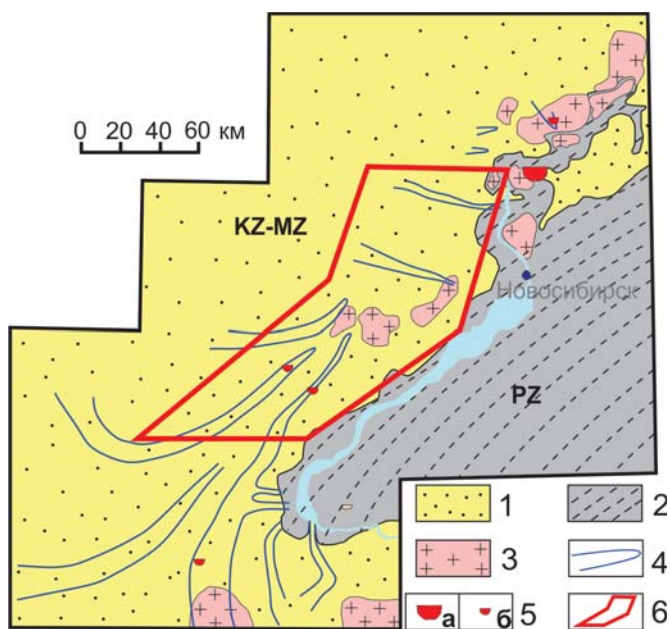


Рис. 4. Геологическая схема Приобской площади с элементами прогноза: 1 — осадочные отложения Западно-Сибирской плиты (KZ-MZ); 2–3 — осадочно-метаморфические породы (2) и геохимически специализированные на уран гранитоиды (3) Алтае-Саянской складчатой области (PZ); 4 — палеодолины юрского возраста; 5 — месторождение Пригородное (а), проявления и аномалии (б) урана; 6 — площадь поисковых работ

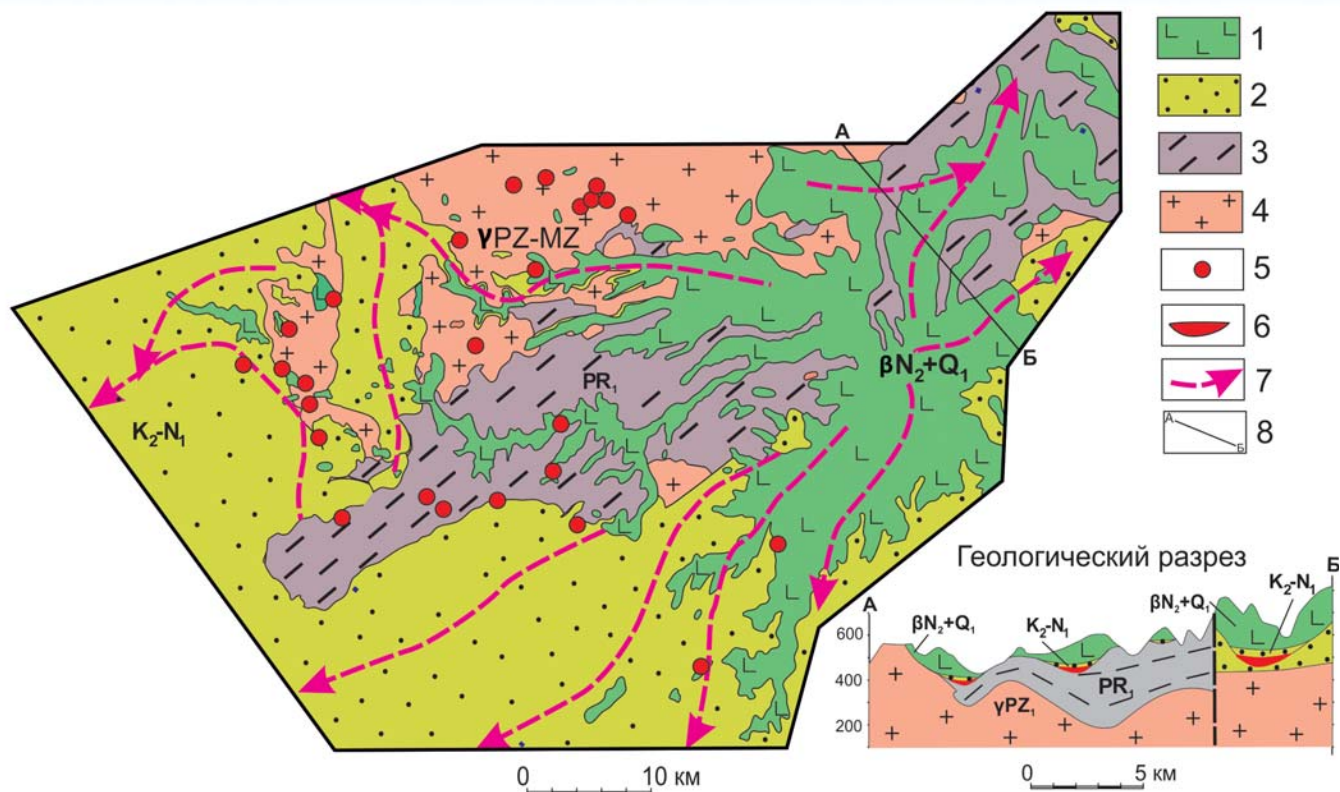


Рис. 5. Геологическая схема и разрез Кульдурской площади с элементами прогноза: 1 — плато-базальты (βN_2+Q_1); 2 — осадочные (пески, глины и др.) и вулканогенные (риолиты, андезиты и др.) породы; 3 — сланцы, амфиболиты, гнейсы (PR_1); 4 — гранитоиды (PZ-MZ); 5 — аномалии и проявления урана; 6 — прогнозируемое урановое оруденение (на разрезе); 7 — предполагаемые палеодолины; 8 — линия разреза

Антасейская площадь (Республика Бурятия) в геологическом отношении располагается на северо-восточном склоне Байсыханского поднятия, слагающая северную часть Витимского рудного района. Запасы и локализованные прогнозные ресурсы урана здесь связаны с гидрогенным оруденением мелких неоген-четвертичных русловых структур, перекрытых платобазальтами. Площадь является наиболее крупной частью района, и с ней связывается значительная доля ресурсного потенциала урана кат. P_3 , который составляет более 70 тыс. т. Степень изученности рассматриваемой территории чрезвычайно низкая. Исключение составляют аэрогеофизические поиски с использованием электроразведочного канала, в результате которых под платобазальтами откартирована сложная система русловых структур. Выявленные структуры нуждаются в заверке бурением, в изучении их формационного состава и, главное, в оценке ураноносности.

Вовлечение в изучение и оценку Антасейской площади диктуется необходимостью расширения минерально-сырьевой базы предприятия АО «Хиагда», производственная мощность которого в перспективе будет увеличена до 1,5–1,8 тыс. т урана в год. Эта задача тем более актуальна по нескольким причинам: во-первых, себестоимость добываемого здесь металла самая низкая в РФ; во-вторых, в Зауральском районе, также разрабатываемом способом СВП, годовое производство металла на АО «Далур» не поднимется выше 500 т даже при вовлечении в освоение месторождения

Добровольное, при этом перспективы наращивания МСБ в районе отсутствуют; в третьих, опыт отработки Хиагдинского месторождения показал, что часть запасов не извлекается по технологическим причинам, что снижает потенциал уже выявленных объектов и увеличивает актуальность наращивания сырьевой базы района за счет поисковых работ.

Проведенные ГРП позволят обеспечить выбывающие добычные мощности действующего предприятия АО «Хиагда». Отработка таких объектов будет осуществляться с применением локальных сорбционных установок, в том числе не исключается создание нового добычного предприятия при наличии не менее 40 тыс. т условных запасов урана, которые могут быть достигнуты по результатам поисковых работ на Антасейской площади.

Кульдурская площадь (Амурская область) располагается в западной части Буреинского гранитного массива и включает Хинганское плато базальтов и восточную окраину Амуро-Зейской впадины. В ее геологическом строении принимают участие структурно-формационные комплексы домезозойского основания — разновозрастные гранитоиды (палеозойские, мезозойские), вулканические и метаморфические образования, и осадочно-вулканогенный платформенный чехол с меловыми, палеогеновыми, неогеновыми и четвертичными отложениями (рис. 5).

В составе пород фундамента доминируют специализированные на уран раннепалеозойские биотитовые и

лейкократовые граниты биробиджанского комплекса и разнотипные гранитоиды, и кислые вулканиты мезозойского комплекса с концентрациями металла от 4 до 8 г/т. На территории отмечаются реликты площадных и линейных кор выветривания, развитых по породам фундамента. Осадочные образования мел-неогенового платформенного чехла представлены разнообломочными хорошо проницаемыми отложениями, часто обогащенными углистыми растительными остатками. По данным предшествующих исследований осадочные накопления образуют несколько русловых структур суммарной протяженностью от 200 км. В гидрогеологическом отношении площадь имеет весьма благоприятное строение для развития инфильтрационных процессов — гидрогеологический гранитоидный массив с трещинно-жильными водами и повышенными (до $n \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$ г/л) содержаниями растворенного урана и система палеорусловых структур с напорными водами гидрокарбонатно-кальциево-натриевого состава. По совокупности структурно-формационных, литологических, гидрогеологических и радиохимических данных Кульдурская площадь является благоприятной для развития ураноносных инфильтрационных процессов и формирования соответствующих промышленных гидрогенных месторождений. Однако до настоящего времени территория на уран не опраивалась. Здесь проведены геолого-съемочные работы м-ба 1:200 000 и на отдельных участках — м-ба 1:50 000, при этом осадочный комплекс вскрыт лишь единичными мелкими скважинами.

Учитывая слабую специальную изученность и значительные размеры Кульдурской площади, здесь предусматривается проведение опережающих поисковых исследований с выделением перспективных участков для постановки детальных работ.

Современные технологии поисков и оценки месторождений урана

Как уже отмечалось, основные перспективы увеличения МСБ урана связаны с поисками скрытого и слабо проявленного уранового оруденения в пределах определившихся потенциально урановорудных районов (ПУРР), что требует разработки современных и эффективных технологий прогнозирования, поисков и оценки.

Приоритетными направлениями развития прогнозно-минералогических и поисковых работ на скрытое урановое оруденение *является создание эволюционно-геологических и объемных глубинных геолого-геофизических моделей перспективных участков недр* [6]. При средне- и крупномасштабном прогнозе скрытого уранового оруденения необходимо применять пространственное моделирование по результатам грави- и магнитных съемок с построением объемных моделей в м-бе 1:200 000 — 1:10 000 распределения плотностных и магнитных масс на базе современных компьютерных технологий, в частности, технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных COSCAD 3D, Oasis montaj (Geosoft) и др. [7, 8]. Такой подход позволяет создавать объемные модели строе-

ния исследуемых участков недр, выявить центры крупных рудно-магматических систем, корневые части которых связаны с глубинными корово-мантийными очагами, фиксирующимися относительными гравитационными минимумами. В области их влияния на глубинах, доступных поисковому бурению, могут быть интенсивно проявлены процессы эндогенного рудогенеза в структурах разгрузки флюидов. Современные и традиционные технологии обработки и интерпретации данных, применяющиеся для различных видов съемок, необходимо дополнить технологией аэрорадиогеохимического картирования (АРК), основанной на исследовании структуры взаимосвязей естественных радиоактивных элементов с применением факторного анализа [1]. Эта технология ориентирована на районирование территории по особенностям радиогеохимического поля, а также на выявление и картирование зон гидротермально-метасоматических изменений пород по материалам аэрогамма-спектрометрической (АГС) съемки.

Проведенные ранее ВИМСом обработка и анализ гравимагнитных данных с применением программного комплекса COSCAD 3D по Урулюнгуевскому району показал, что на глубинах 30–60 км ниже Стрельцовской ВТС картируются объемные гравитационные минимумы — крупные магматические очаги, которые ближе к дневной поверхности распадаются на серию узких зон, отвечающих каналам концентрированного массопереноса термальных растворов рудного вещества. Результаты интерпретации данных АГС-съемки по технологии АРК позволили установить, что Стрельцовское рудное поле, несмотря на скрытый характер уранового оруденения, представляет собой область существенного привноса урана, в то время как смежные территории преимущественно отвечают зонам выноса.

Аэрогеофизические технологии. В последнее десятилетие во всем мире происходит интенсивное развитие инновационных аэрогеофизических технологий и соответствующих технических средств, направленных на повышение эффективности проводимых ГРП на уран. За рубежом значительная часть поисковых и оценочных работ до глубин 300–500 м проводится с помощью комплексной АГС-съемки, а наземные исследования применяются исключительно как заверочные. Использование вертолетных геофизических платформ нового поколения и приближение сенсоров и передатчиков к поверхности наблюдения на сверхнизкой траектории полета, высокая точность регистрации геофизических полей позволяют выявлять новые поисковые объекты даже там, где ранее проводилась наземная геофизика, а в некоторых случаях аэрогеофизические аномалии практически сразу же заверяются бурением. Разработка и применение современных аэрогеофизических технологий для прогнозирования и поисков месторождений урана различных геолого-промышленных типов на западе осуществляются главным образом компанией Geotech Ltd. В России передовыми технологиями проведения съемок, обработки и ин-

терпретации данных обладает ГНПП «Аэрогеофизика», которая проводит практически весь комплекс аэрогеофизических исследований на разных стадиях геологоразведочного процесса для решения широкого спектра задач.

Аэрогамма-спектрометрическая съемка широко используется при поисках урановых месторождений различных геолого-промышленных типов как в комплексе с другими методами, так и самостоятельно и, по сути, является прямым методом поисков. Метод позволяет определять элементы геологического строения, изучать характер и интенсивность метасоматических процессов. Современные гамма-спектрометры обладают высокой чувствительностью, что позволяет картировать геологические образования, для которых характерны низкие содержания радиоактивных элементов. Для проведения АГС-съемки в России используются современные цифровые 1024-канальные спектрометры RSX-4(5) с полициновыми детекторами NaJ(Tl) емкостью до 48 л. Несмотря на то что АГС-съемка не позволяет выявлять аномалии урана «слепого» типа, она до сих пор широко применяется при поисках месторождений урана, в том числе и за рубежом. Так, в бассейне Атабаска на основе данных калиевого канала в песчаниках чехла прослеживаются зоны иллитизации, нередко свидетельствующие о наличии «слепого» уранового оруденения на глубине — в фундаменте или на границе ССН.

Лидирующее положение в сфере *аэроэлектромагнитных технологий*, как уже упоминалось, принадлежит канадской компании Geotech Ltd., занимающейся разработкой и производством съемок по всему миру. Они проводят исследования с применением двух основных вертолетных аэроэлектроразведочных систем: ZTEM и VTEM.

Система ZTEM основана на регистрации естественного электромагнитного поля и является наиболее эффективной технологией картирования удельных сопротивлений с наибольшей среди всех существующих аэрогеофизических систем, глубиной исследований до 2 км. Она позволяет решать задачи поисков различных типов месторождений урана, золота, полиметаллов, металлов платиновой группы, а также выделять тектонически ослабленные зоны, которые зачастую «не видны» в магнитном поле. Технология ZTEM широко используется в бассейне Атабаска (Канада) на месторождениях типа «несогласия». Этим методом с высокой точностью можно картировать рудовмещающие комплексы пород — высоко проводящие углеродистые сланцы на глубину до 800 м под высокоомным чехлом песчаников [11]. Система VTEM основана на изучении затухания магнитного поля вихревых токов, возникающих в электропроводящих средах при резком выключении тока в генераторной рамке. Она характеризуется большей чувствительностью и низким уровнем шума по сравнению с другими аэро-электромагнитными методами, а также глубиной до 500 м. Использование систем, основанных на методе переходных процессов, позволяет выделять маломощ-

ные контрастные по электрическим свойствам объекты как, например, зону несогласия между чехлом и фундаментом в урановорудном бассейне Аллигейтор-Риверс (Сев. Австралия), сопровождаемую гидротермально-метасоматическими изменениями пород. Примерами успешного применения аэрометодов для поисков месторождений урана песчаникового типа могут служить результаты работ компании ГНПП «Аэрогеофизика» в Витимском урановорудном районе. В частности, детальной аэрогеофизической съемкой с использованием электроразведки были откартированы перспективные на уран палеорусловые структуры, перекрытые платобазальтами.

Аэромагниторазведка является одним из основных методов в комплексе геофизических исследований при проведении поисковых работ на различные виды твердых полезных ископаемых, в том числе на уран. Современные аэромагнитометры характеризуются высоким разрешением и производительностью, что позволяет получать детальные данные о геологическом строении фундамента и осадочного чехла. Кроме измерений напряженности магнитного поля они выполняют съемку методом градиентометрии. Данные вертикального градиента магнитного поля обладают лучшим пространственным разрешением и играют значимую роль при изучении близповерхностных объектов. Примером успешного применения аэромагниторазведки при поисках месторождений урана можно считать Шангулежскую площадь, где были откартированы многочисленные дайки базитов, связанные пространственно и во времени с богатым урановым оруденением. По результатам этих работ на юге площади дополнительно был выделен перспективный участок с интенсивным проявлением основного магматизма в виде роя разнонаправленных даек.

В настоящее время наметилась тенденция дальнейшего совершенствования аэрогеофизических технологий в связи с использованием *беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)*. Создание беспилотной аэрогеофизики позволяет ввести в систему аэрогеофизических исследований новый высотный уровень измерений — первые десятки метров над землей. Полученные результаты — это, с одной стороны, «квази-наземные» измерения с определенной высоты со всеми достоинствами традиционных аэроизмерений: быстротой, комплексностью, экономической выгодой и др., а с другой стороны — это аэросъемка на малой высоте с возможностью непосредственной детализации на этапе поисков и разведки месторождений. За рубежом активно ведутся разработки методов и технических средств беспилотной аэрогеофизики, которые можно применять, в том числе, и для поисков урановых руд. Так, в Японии был создан радиометрический комплекс на базе беспилотного вертолета Yamaha с гамма-спектрометром ARMS. При массе беспилотника в 94 кг вес радиометрической аппаратуры составляет около 10 кг. Аппарат с более совершенным оборудованием использовался специалистами из Великобритании для радиоэкологических исследова-

ний. На БПЛА массой 7 кг был установлен гамма-спектрометр на базе детектора объемом 1 см³ массой всего 60 г. В Белоруссии налажен серийный выпуск многофункционального беспилотного серийно производимого с 2014 г. АГС-комплекса вертолетного типа INDELA SKY. При максимальном взлетном весе беспилотника в 140 кг и стандартном запасе топлива на 5 часов полета полезная нагрузка составляет 25 кг. Для проведения АГС-съемки на вертолете установлена спектро-дозиметрическая аппаратура производства компании «АТОМТЕХ» (Белоруссия). Легкий гамма-спектрометр RS-607 весом не более 3,6 кг, разработанный компанией Radiation Solutions Inc. (Канада), установлен на беспилотном вертолете и используется в разведочной геофизике.

В РФ в настоящее время наиболее обнадеживающие результаты по созданию и внедрению в практику ГРП на уран беспилотных аэрогеофизических технологий были получены компанией «Геоинформационные технологии-Сибирь» в содружестве с ФГБУ «ВИМС» при проведении опытно-методических работ с целью апробации и внедрения передовых методов поисков и оценки «слепого» уранового оруденения типа «несогласия» на эталонном месторождении урана Столбовое (Восточное Присаянье). В сложных природно-ландшафтных и геологических условиях на беспилотном мультироторном коптере были выполнены магнитная и гамма-съемки м-ба 1:10 000. Данный беспилотный комплекс имеет взлетный вес до 20 кг с массой полезной нагрузки 2–4 кг, время полета до 30 мин. со скоростью 0–40 км/ч на высоте от первых до десятков метров над рельефом. Для магнитной съемки на БПЛА был установлен протонный оверхаузеровский магнитометр массой 2 кг. Для гамма-спектрометрической съемки был использован гамма-спектрометр массой 4 кг с кристаллом CsI (80×80 мм). Качество полученных данных не уступает, а по некоторым параметрам и превосходит результаты ранее проведенных пешеходных съемок.

Наземные и скважинные геофизические технологии

В настоящее время при проведении поисковых работ на уран необходимо учитывать преимущественно скрытый характер ожидаемого оруденения. Поэтому к наземным и скважинным технологиям предъявляются требования, позволяющие разрабатывать достоверные структурно-геофизические объемные модели объектов, которые служат основой для планирования дорогостоящих горно-буровых работ. В этой связи применяется широкий комплекс геофизических методов, который определяется с учетом геолого-промышленного типа месторождений, геолого-структурных и ландшафтно-геоморфологических условий поисков.

Основным методом поисков является *гамма-спектрометрическая съемка*, которая входит в стандартный традиционный комплекс геофизических исследований. Она позволяет картировать радиоактивные аномалии, формации, ореолы гидротермально-метасоматических изменений, а также различные элементы рудоносных структур.

Сейсморазведочные работы входят в комплекс исследований при поисковых работах как на уран, так и на другие виды ТПИ. Метод отраженных волн (МОВ) является главным при решении разномасштабных задач структурно-тектонического картирования. Сейсморазведку проводят в варианте 3D-съемки, что позволяет выделять геологические границы, тектонические нарушения, а также, что наиболее важно для поисков уранового оруденения, зоны структурно-стратиграфических несогласий, границы вулканотектонических структур, положение перекрытых палеодолин и др. Задачи, связанные с картированием границ фундамента и чехла, решаются также методом преломленных волн (МПВ). Метод МПВ имеет наибольшую разрешающую способность и информативность при изучении рельефа кристаллического фундамента, выделении зон тектонических нарушений, контактов интрузивных образований и различных структурно-литологических неоднородностей, а также при картировании кор выветривания. Так, по результатам сейсморазведки в Зауральском урановорудном районе были установлены погребенные юрские палеодолины на глубинах от 200 до 600 м, являющиеся здесь основными рудоносными структурами. В свою очередь в Канаде во впадине Атабаска по результатам опытно-методических сейсморазведочных работ была откартирована зона ССН, а также участок ее деформации, отвечающий месту расположения уникального месторождения урана McArthur River.

В последнее время в РФ и за рубежом применяется метод микросейсмического зондирования (ММЗ), позволяющий выявлять вертикальные структурно-магматические неоднородности, связанные с трансформными зонами повышенной проницаемости [12].

Электромагнитные исследования. Высокую эффективность при поисковых работах на уран показали результаты аудио магнитотеллурических (АМТЗ) исследований, которые позволяют успешно выделять области низких значений удельного сопротивления, связанные с графит- и сульфидсодержащими породами, часто контролирующими урановую минерализацию. Наряду с магнитотеллурическими исследованиями широко распространен метод переходных процессов. Его эффективность была доказана при поисках скрытого уранового оруденения в Чарском районе, где были установлены зоны углеродсодержащих сланцев с рядовыми и богатыми рудами.

Высокоточная гравиметрия в настоящее время все чаще применяется в стандартном комплексе методов при проведении поисковых работ на уран и другие ТПИ, благодаря активному развитию систем геопозиционирования и современного высокоточного гравиметрического оборудования. Метод позволяет выделять локальные малоинтенсивные аномальные зоны гравитационного поля, которые отражают особенности, связанные с различными геологическими факторами, такими как области проявления метасоматических, в том числе ураноносных изменений и др. [9]. По резким градиентам гравитационного поля эффектив-

но определяются места потери корреляции, отвечающие разрывным нарушениям и тектоно-метасоматическим зонам в целом. Одним из недавних примеров успешного применения такого рода поисковых комплексов являются исследования в южной части бассейна Атабаска, где по результатам заверки бурением локального гравитационного минимума было выявлено крупное месторождение Арроу.

При поисках и оценке уранового оруденения в комплексе геофизических работ также входят *скважинные методы исследований*, позволяющие в совокупности с наземными и аэро- методами получать наиболее достоверные данные о строении разреза месторождений, оценивать параметры и характеристики рудных залежей. Скважинные измерения *естественной гамма-активности* пород находят наибольшее применение при поисках урановых руд. Они дают возможность детально расчленять литолого-стратиграфический разрез, оценивать фильтрационные свойства горных пород, с высокой точностью определять мощность, концентрацию и запасы урана.

Гравиметрические наблюдения в скважинах позволяют получать необходимые данные для более точной интерпретации наземной гравиразведки. В настоящее время при проведении ГРП используется система Gravilog, ориентированная на выявление и оценку рудных тел как вскрытых скважиной, так и находящихся на удалении от нее. Метод позволяет устанавливать малые объекты на больших глубинах (до 2 км) и определять их геометрические параметры.

Межскважинная электротомография является одним из самых высоко разрешающих методов исследований. Метод позволяет выделять неоднородности на больших глубинах и в условиях сложных сред. Измерения проводятся в двух скважинах, между которыми изучается разрез путем погружения в них коммутируемых многоэлектродных кос с последовательной сменной положением питающих и приемных электродов. Метод позволяет картировать зоны метасоматических изменений за счет контрастности значений удельных электрических сопротивлений, а также мощность осадочного чехла для условий залегания урановых месторождений типа «несогласия». Также в комплексе электромагнитных методов скважинных исследований стандартно входят методы электрического каротажа (КС, ПС), которые позволяют получить информацию о литолого-стратиграфическом строении разреза и оценить фильтрационные свойства пород.

Сейсмические исследования *скважин* методом продольного и непродольного ВСП проводятся с целью детального картирования отражающих границ и заверки данных наземных работ. Опыт применения метода на урановом месторождении «несогласия» Миллениум в бассейне Атабаска (Канада) показал возможность картирования границы несогласия в районе ствола скважины, выявления разломных нарушений и уточнения геологического строения разреза, что послужило основанием для выбора места заложения карьера. При работе одновременно в нескольких скважинах

используют технологию межскважинного прозвучивания. Комбинация положений источников и приемников в скважинах позволяет с высокой точностью провести реконструкцию свойств геологического разреза между скважинами, проследить контрастные границы, картировать разломные нарушения и зоны метасоматических изменений.

В отечественной урановой поисковой практике скважинные методы гравиметрии, электротомографии и сейсморазведки не используются; весьма ограниченное применение они имеют и на зарубежных урановых объектах. В то же время на другие виды ГПИ, в том числе на Cu, Ni, Co данные методы апробированы и дают положительные результаты. Это свидетельствует о принципиальной возможности внедрения их модификаций в поисково-оценочный комплекс ГРП на уран.

Геохимические и изотопно-геохимические методы поисков скрытых урановых месторождений

В текущих работах геологоразведочных и добывающих предприятий («Cameco Corporation», «AREVA Resources Canada Inc.», «Uranium minerals Inc.» и др.) на передний план вышли геохимические технологии, позволяющие устанавливать скрытую минерализацию, в том числе на большой глубине под дальнепринесными отложениями, слабопроницаемыми породами, в условиях вечной мерзлоты и др. Основа этих методов — выявление и интерпретация очень слабых геохимических сигналов, формирующихся за счет современной восходящей миграции рудных и сопутствующих элементов и соединений в наиболее чувствительных по отношению к экзогенным процессам объектах (в отдельных гранулометрических и весовых фракциях горных пород и почв, в формах нахождения элементов, газов, биомассе и др.). Вид опробования обычно дает название методикам, которые традиционно выделяют в несколько условных групп.

Среди *методов частичного извлечения элементов*, используемых на разных стадиях геохимических работ по вторичным наложенным ореолам рассеяния, наиболее распространены селективные и неселективные методики выщелачивания, геоэлектрохимические и другие методы, предназначенные для преимущественного извлечения и количественного анализа подвижных форм, в которых выше доля экзогенных элементов, мигрирующих преимущественно в водных растворах. Так как проявленность и характеристики наложенных ореолов существенно зависят от локальных геологических, ландшафтных и климатических условий, то методы и процедуры селективной экстракции необходимо подбирать под конкретные задачи и объекты. На разных стадиях работ наиболее результативны технологии последовательного извлечения отдельных минеральных форм с количественным определением максимального числа химических элементов и расчетом суммарных показателей (Wang X., 2003, 2011, 2015). Подобная схема с последовательной обработкой деионизированной водой, цитратом аммония, уксусной кислотой и гидроксиламином успешно при-

менена при региональных работах на урановое оруденение песчаникового типа в Китае [13]. На скрытых урановых объектах других типов и в других обстановках могут быть также эффективны методики прецизионного мультиэлементного анализа с экстракцией растворами ацетата аммония и гидроксилamina (Power M.J. et al., 2012), разложением царской водкой почвенной фракции < 2 мкм [10], экстракцией бидистиллятом тонкой фракции рыхлых отложений [4], обработкой зерна 2 % HNO₃ в ультразвуковой ванне (Holk G.J. et al., 2003) и др. Достоверность результатов исследований существенно повышается за счет привлечения изотопных данных.

Варианты *методики слабокислотного выщелачивания* используются для поисков глубокозалегающих урановых руд в Австралии и Канаде с 2000-х годов (месторождения Jabiluka, McArthur River, Cigar Lake и др.). Опробование с определением изотопного состава свинца и урана в вытяжках проводится по керну, почве и растительности. Как показывают исследования, аномальные значения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb/²³⁸U и другие геохимические признаки фиксируются на расстоянии до 1100 м от объекта (Holk G.J. et al., 2003).

Определение ²¹⁰Po, ²¹⁰Pb в кислотных и ²³⁴U, ²³⁸U в карбонатных вытяжках (подвижные формы) предусматривает *изотопно-почвенный метод (ИПМ)*. В 2013 г. опытно-методические исследования ИПМ были выполнены на юго-восточном фланге месторождения Северный Харасан (Казахстан) с глубиной залегания рудных тел 500 м и более. По комплексным показателям были выделены аномальные зоны с доказанной ранее рудоносностью, а также новые участки, где бурение заверочных скважин подтвердило присутствие урановой минерализации [3].

Одним из наиболее востребованных на сегодня является *метод подвижных ионов металлов* (Mobile Metal Ion™ — MMI), основанный на разложении водорастворимых и адсорбированных почвенных форм с извлечением целевых групп рудных и ассоциированных металлов в виде устойчивых химических комплексов. В комплекс MMI входит несколько типов селективных реагентов и соответствующие прецизионные аналитические процедуры, на практике чаще всего применяется мультиэлементная экстракция. Эффективность метода обусловлена высокой контрастностью аномалий, как правило, не смещенных относительно проекции рудного тела, меньшим количеством ложных сигналов и относительно невысокой стоимостью работ. Эти преимущества MMI с доработкой аппаратно-методической части (снижением порога определения V, Cr и S) были использованы для локализации скрытого оруденения жильного типа в районе Mount Isa (Австралия); индикатором минерализации служили отчетливые геохимические ореолы подвижного урана в окружении локальных аномалий ванадия (www.sgs.com).

Предварительные результаты опытно-методических работ 2017 г. по апробации комплекса современных

изотопно-геохимических методов на Кулариктинском участке Витимского урановорудного района, выполняемых ФГБУ «ВИМС», показали эффективность использования отдельных процедур частичной экстракции. Скрытое урановое оруденение достаточно сложного строения дифференцировано по комплексу показателей (аномальные отношения ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb/²⁰⁸Pb, ²³⁴U/²³⁸U в различных типах вытяжек и др.). Аналогичные схемы опробования, а также другие инновационные геохимические методики с привлечением ведущих исследовательских организаций в настоящее время реализуются на объекте Столбовое.

При поисках скрытых месторождений урана также применяется *группа геоэлектрохимических методов*, впервые предложенных в России и эффективных на глубинах до 400 м (Hoover D.V. et al., 1997). Подобные исследования главным образом методом частичного извлечения металлов (ЧИМ) выполнялись в Китае, Индии, Канаде, Австралии и др.

Интересные результаты и соответствующие перспективы связаны с методами, изучающими наномеханические ореолы рассеяния металлов в газах, почвах и горных породах над погребенными рудами.

Атмохимические (газовые) методы, изучающие геохимические и изотопно-геохимические ореолы газообразных, летучих и сопутствующих компонентов, традиционно востребованы при поисках уранового оруденения на значительных глубинах. Наиболее широкое распространение среди них получили различные варианты определения концентраций гелия и изотопов радона. В последние десятилетия активно развивались прецизионные газовые методы с определением широкого спектра углеводородов и других органических и неорганических компонентов геогаза (Malmqvist L. et al., 1999, Cameron E.M. et al., 2004, Sutherland D., 2010 и др.).

Универсальный *метод по углеводородам в почвенном газе (SGH)*, разработанный в Канаде, используется в том числе для поисков и локализации глубокозалегающих урановых руд (Sutherland D., 2007, 2010 и др.). Среди его преимуществ более точная локализация поисковых объектов, относительно невысокая стоимость работ, возможность опробования по различным компонентам практически круглогодично. На месторождении Cigar Lake успешно апробирована новая методика, предусматривающая определение изотопов углерода и азота в экстрагируемом почвенном газе [10].

Развитие *биогеохимических и гидрогеохимических методов*, характеризующихся высокой глубиной при экспрессности пробоотбора, также связано с привлечением новых методик анализа, в том числе с определением фракций углеводородов, галогенов, изотопного состава, характеристик биомассы. К ним относится микробиологическое опробование (МЕТ) по специфической кислородной метке, использованное при поисках урановой минерализации на объекте Cigar West (Канада) на глубине более 400 м [10].

Прогнозно-поисковые комплексы на перспективных площадях

Представленные российские и зарубежные разработки по методам поисков месторождений урана до вовлечения их в геологоразведочный процесс должны проходить апробацию на известных эталонных объектах. В этой связи ВИМСом совместно с АО «Геоинформационные технологии — Сибирь» и рядом других организаций отрасли были проведены опытно-методические работы на *Шангулежской площади* с урановым месторождением Столбовое. Комплекс этих исследований включал аэрогамма- и магнитную съемки на БПЛА и наземные методы: электротомографию, сейсморазведку (МОР), высокоточную гравиразведку, лито- и биогеохимические исследования и др. По результатам опытных работ уже сейчас для Шангулежской площади предварительно намечен необходимый ППК, включающий:

аэрогамма- и магнитную съемки на БПЛА м-ба 1:10 000 с целью картирования границы ССН, ураноносных зон, трассирующих их базитовых интрузий, а также прослеживания их под чехлом рифейских песчаников;

геолого-радиометрические маршруты с постоянным прослушиванием и гамма-спектрометрию вдоль зоны ССН, а также в пределах радиоактивных аномалий, выявленных на дневной поверхности для установления их природы;

проходку канав в пределах выявленных аномалий урана и зон контактов пород, ССН с геологической документацией и отбором проб;

наземные геолого-геофизические и геохимические ГРП м-ба 1:10 000 в области сопряжения потенциально ураноносных запад-северо-западных и субмеридиональных зон под чехлом рифейских песчаников;

ведущий электромагнитный метод — МПП с целью картирования зон околорудной сульфидизации;

высокоточную гравиразведку для выявления локальных аномалий и градиентных зон, отвечающих зонам интенсивной тектоно-метасоматической проработки;

высокоразрешающие сейсмические исследования методом отраженных волн с целью картирования зоны ССН и участков ее деформации;

литогеохимическое опробование по вторичным ореолам и изотопно-почвенный метод (ИПМ) с целью выявления элементов-индикаторов рудного процесса и продуктов полураспада урана;

эманационную съемку САН — выявление аномалий радонопотока;

заверку скважинами с комплексом ГИС, геологической документацией керна и отбором проб на локальных перспективных участках;

оперативное (полевое) определение химического и минерального состава пород с применением новейших портативных спектрометров и др.

В свою очередь планируемый ППК для *Кульдурской площади* Приамурья в целом отвечает эффективной методике, применяемой в Витимском урановорудном районе, а именно:

АГСМ-съемка с электроразведочным каналом м-ба 1:50 000 с целью установления предполагаемых палеодолин и радиоактивных аномалий;

геолого-радиометрические маршруты и наземные гамма-спектрометрические исследования в пределах радиоактивных аномалий;

радиогидрогеохимическое опробование по стоку малых рек, родникам и другим водотокам;

в пределах предполагаемых палеодолин с целью их заверки — комплексные наземные геолого-геофизические работы в профильном варианте: электропрофиллирование (ПЕЭП или ДЭП-ВП), электротомография (МПП), электротомография, магниторазведка, высокоточная гравиразведка;

литогеохимическое опробование по вторичным ореолам и изотопно-почвенный метод (ИПМ) с целью выявления элементов-индикаторов рудного процесса и продуктов полураспада урана;

эманационная съемка САН для выявления аномалии радонопотока;

профильные буровые работы с комплексом ГИС, геологической документацией и отбором проб в пределах выделенных потенциально ураноносных палеодолин.

Заключение

Для обеспечения потребностей атомной энергетики России необходимо воспроизводство и расширение отечественной минерально-сырьевой базы природного урана. В сложившейся ситуации важнейшей задачей геологической отрасли является выявление крупных урановорудных объектов с приемлемыми параметрами руд, экономически заслуживающих создания новых горно-добычных предприятий.

Подобным требованиям отвечают гидрогенные месторождения урана в песчаниках, осваиваемые экономичным способом подземного выщелачивания и эндогенные месторождения в вулканотектонических структурах и в зонах древних структурно-стратиграфических несогласий с богатыми рудами. Поиски объектов этих геолого-промышленных типов проводятся в настоящее время и планируются на среднесрочную перспективу в южных районах Сибири, в Забайкалье и Приморье. В связи с наметившимся дефицитом поисковых площадей является актуальным развитие региональных прогнозно-минерагенических исследований по выявлению новых рудоперспективных структур, заслуживающих проведения детальных геологоразведочных работ. Подобные исследования предлагается реализовать в потенциально ураноносных районах Чукотки, Яна-Колымского и Охотского регионов, а также в Приамурье. Последнее десятилетие характеризуется исчерпанием легко открываемых приповерхностных урановых объектов, что требует активизации поисков на скрытое оруденение на новой методической основе. Приоритетным направлением развития прогнозных и поисковых работ на скрытое урановое оруденение является создание эволюционно-геологических и глубинных геолого-геофизических моделей перспективных участков недр по

геолого-геофизическим, аэрогеофизическим, геохимическим материалам и данным бурения.

В настоящее время во всем мире происходит интенсивное развитие инновационных аэрогеофизических, в том числе беспилотных технологий и соответствующих технических средств, направленных на повышение эффективности проводимых ГРП на уран. Стремительно развиваются также наземные и скважинные технологии, позволяющие создавать достоверные объемные модели объектов, которые служат основой для планирования дорогостоящих горно-буровых работ. Важнейшее место при поисках скрытого уранового оруденения принадлежит геохимическим и изотопно-геохимическим методам, позволяющим обнаруживать скрытое оруденение на значительных глубинах.

С учетом развития современных инновационных технологий представляется возможным сформировать рациональные прогнозно-поисковые комплексы для конкретных перспективных площадей с учетом ландшафтно-геоморфологических и геолого-структурных условий ведения ГРП. Эти комплексы должны проходить апробацию на объектах-эталонах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краснов, А.И. Аэрорадиогеохимическое картирование. Методические рекомендации / А.И. Краснов, Е.Б. Высокоостровская, Е.И. Зубов и др. — Л.: НПО Рудгеофизика, 1983. — 104 с.
2. Бабкин, Н.Я. Эволюционно-геологическая модель формирования «слепых» и слабопроявленных месторождений урана типа «несогласия» в Восточном Присяянье / Н.Я. Бабкин, Н.А. Гребенкин, А.П. Долгушин и др. // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 3. — С. 3–8.
3. Бахур, А.Е. Радиоизотопные методы при поисках и оценке инфильтрационных месторождений урана в Южном Казахстане / А.Е. Бахур, Т.М. Овсянникова, Л.И. Мануилова и др. // Информационный сборник. Материалы по геологии, поискам и разведке месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Вып. 159. — М.: РИС «ВИМС», 2015. — С. 363–377.
4. Виноградова, И.В. Применение метода ионно-солевого комплекса (ИСК) при ревизионно-поисковых и поисково-оценочных работах на уран / И.В. Виноградова, В.Е. Голомолзин, А.Н. Сергеев, В.В. Шаулкин // Уран: геология, ресурсы, производство. Тезисы Третьего международного симпозиума — М.: ВИМС, 2013. — С. 34–36.
5. Долгушин, А.П. Условия формирования и локализации уранового и золото-уранового оруденения в докембрийских формациях Северо-Енисейского района: Автореф. дисс. / А.П. Долгушин. — М.: ВИМС, 2009.
6. Машковцев, Г.А. Современные научные основы прогнозирования урановых месторождений / Г.А. Машковцев, А.К. Мигута, В.Н. Щеточкин // Уран: Ресурсы и производство. Второй международный симпозиум. Москва, 26–28 ноября 2008 г. Сборник тр. — М.: ВИМС, 2009. — С. 40–60.
7. Петров, А.В. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» / А.В. Петров, Д.Б. Юдин, Хоу Сюели // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2010. — № 2. — Вып. 16. — С. 126–132.
8. Шаткевич, С.Ю. Моделирование разноранговых ураноносных объектов в потенциальных полях / С.Ю. Шаткевич // Геофизические методы исследования Земли и ее недр. — 2016. — С. 146–156.
9. *Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration.* — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013.
10. Drever, G. Geosphere-Biosphere Orientation Study over the Cigar West Unconformity Uranium Deposit in the Athabasca Basin of Northern Saskatchewan. Final Report / G. Drever et al. / Uravan Minerals Inc., Athabasca Basin, Saskatchewan, July, 2010.
11. Lo, B. Z-TEM™ (Airborne AFMAG) tests over unconformity uranium deposits / B. Lo, J. Legault, P. Kuzmin. — 2009, Geotech Ltd.
12. Powell, B. Advances in Geophysical Exploration for Uranium Deposits in the Athabasca Basin, Plenary Session: Ore Deposits and Exploration Technology / B. Powell, G. Wood, L. Bzdel. — 2007. — С. 771–790.

13. Wang, X. Deep-penetrating geochemistry for sandstone-type uranium deposits in the Turpan–Hami basin, north-western China / X. Wang, S. Xu, B. Zhang, S. Zhao / Applied Geochemistry, 26 (2011) 2238–2246.

© Коллектив авторов, 2017

Машковцев Григорий Анатольевич // vims@df.ru
Алтунин Олег Викторович // papamargo@yandex.ru
Гребенкин Николай Анатольевич // grebenkin2@mail.ru
Коротков Владимир Викторович // vvk46@list.ru
Овсянникова Татьяна Михайловна // lab@u238.ru
Ржевская Анна Кирилловна // anna.k.rzhevskaya@gmail.com

УДК.553.04 (470)

Святецкий В.С., Полонянкина С.В., Ермаков А.Г.
(АО «Атомредметзолото»)

УРАНОДОБЫВАЮЩАЯ ОТРАСЛЬ РОССИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

*Рассмотрены состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы урана АО «Атомредметзолото». Охарактеризовано состояние уранодобывающей отрасли в России в целом и по отдельным уранодобывающим предприятиям ПАО «ППГХО», АО «Хиагда» и АО «Далур». Отражены основные планы по развитию уранодобывающих предприятий и существующие проблемы. **Ключевые слова:** уран, рынок урана, минерально-сырьевая база урана, добыча, скважинное подземное выщелачивание, обеспеченность запасами, восполнение ресурсной базы.*

Svyatetskiy V.S., Polonyankina S.V., Ermakov A.G.
(Atomredmetzoloto)

URANIUM-MINING INDUSTRY OF RUSSIA:
THE STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

*The article deals with the state and prospects of development of the uranium mineral resource base of JSC «Atomredmetzoloto». The state of the uranium mining industry in Russia and for individual uranium mining enterprises of PJSC «PPGHO», JSC «Hiagda» and JSC «Dalur» is characterized. It is reported the main plans for the development of uranium mining enterprises and existing problems. **Keywords:** uranium, uranium market, uranium mineral resource base, mining, subsurface leaching, provision of reserves, replenishment of resource base.*

Минерально-сырьевая база урана АО «Атомредметзолото»

АО «Атомредметзолото» — Горнорудный дивизион Госкорпорации «Росатом» — консолидирует предприятия по добыче урана на территории Российской Федерации, находящиеся на разных стадиях жизненного цикла: от геологоразведки до промышленной эксплуатации месторождений. Стратегическая цель дивизиона — обеспечение потребностей Госкорпорации «Росатом» в российском уране по конкурентоспособной себестоимости и без геополитических рисков. В контуре управления АО «Атомредметзолото» нахо-