УДК 622.775

А.В. Чекулаев
Санкт-Петербургский горный университет
кафедра геофизических и геохимических методов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых[1]
аспирант
alexchekulaev09@yandex.ru

Прогрессивные технологии при разведке и добыче урана для атомной энергетики

[1]Россия, 199026, Санкт–Перербург, В.О., 21 линия, 2.

Автор рассматривает перспективы применения и развития атомной энергетики, современные способы и технологии, применяемые для разведки и добычи урана в качестве энергетического сырья для атомных электростанций

Ключевые слова: источники энергии; атомная электроэнергия; методы разведки и добычи; добыча урана; подземное скважинное выщелачивание

На сегодняшний день тепловые энергостанции обеспечивают порядка 64% общего производства электроэнергии. Однако доля рентабельно добываемых углеводородов постепенно уменьшается, и рано или поздно будут востребованы другие источники энергии, которые смогут обеспечить необходимые энергозатраты. В связи с растущими заботами об окружающей среде и проблемами энергообеспечения правительствами многих стран мира предпринимаются усилия по совершенствованию и развитию энергосберегающих технологий – альтернативных источников энергии, т.е. виды устройств, генерирующих электричество и тепло, используя в качестве источника энергии силу ветра, энергию солнца, течение рек и т.п. В некоторых странах наблюдается переход энергопотребления на альтернативные источники.

Солнечная энергетика – эффективный способ получения электроэнергии путем преобразования солнечного света в электрический ток, которое может осуществляться при помощи фотоэлементных панелей или нагрева воды путем отражения солнечного света. Солнечные электростанции (СЭС) доказали свою эффективность, как например, башенные СЭС в Сан-Бернардино, Калифорния. Но использование энергии солнца возможно лишь в странах с большим количеством солнечных дней в году, для стран, где количество солнечных дней в году менее 70%, применение солнечных панелей нерентабельно и малоэффективно.

Ветроэнергетика специализируется на использовании кинетической энергии воздушных масс в атмосфере. Для получения большого объема энергии требуется строительство целых «полей» ветряков, что не везде возможно, поскольку требуются большие площади.

Еще один вид использования экологически чистой энергии в больших объемах – течение рек и приливно-отливные силы. Строительство гидроэлектростанций (ГЭС) позволяет обеспечить электроэнергией целые регионы. В России по состоянию на 2016 г. имеется 15 действующих ГЭС мощностью свыше 1000 МВт, и более сотни ГЭС меньшей мощности. Поскольку гидроэлектростанции для производства электрической энергии используют течение рек, конечная стоимость электроэнергии, вырабатываемой ГЭС, значительно ниже, чем при использовании других видов электростанций. Однако строительство мощных станций возможно лишь в районах с большими запасами энергии воды. К тому же, использование ГЭС сопряжено с некоторыми экологическими проблемами – нерегулируемые пропуски воды из водохранилищ приводят к перестройке уникальных пойменных экосистем по всему руслу рек. Строительство приливных электростанций возможно лишь на берегах морей.

Геотермальная энергетика подразумевает преобразование тепловой энергии недр Земли в электрическую. Сооружение геотермальных электростанций целесообразно в районах с высокой геологической активностью, где естественный источник тепловой энергии находится на сравнительно небольшой глубине. В таких областях обычно распространены гейзеры, открытые термальные источники. Однако таких районов немного.

Для обеспечения большим количеством энергии регионов, не располагающих возможностью использования природных возобновляемых ресурсов, широко применяется ядерная (атомная) энергетика. Атомные электростанции разной мощности применяются для обеспечения энергией как отдельных городов, так и целых регионов, иногда – стран. Для получения ядерной энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер плутония-239 или урана-235. Кинетическая энергия осколков деления быстро преобразуется в тепловую, которая нагревает воду, поступающую в турбины, вырабатывающие электроэнергию. Ядерная энергия используется также на атомных ледоколах и атомных подводных лодках.

Важные преимущества применения АЭС:

– отсутствие выбросов углекислоты – в отличие от станций, работающих на сжигаемых углеводородах;

– низкая доля топливной составляющей в себестоимости производимой энергии. Это преимущество делает атомную электроэнергетику конкурентоспособной в условиях роста цен на ископаемые углеводородные энергоносители.

Реализация конкурентоспособных проектов по производству дешевой и чистой атомной энергии требует применения современных методов добычи и разработки уранового сырья, а также высокой технологической дисциплины. Нарушения технологии при сооружении АЭС или их эксплуатации могут привести к трагическим последствиям, достаточно вспомнить аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. и на АЭС Фукусима в 2011 г.

Атомная энергетика в настоящее время обеспечивает около 17% мирового энергопроизводства. Сегодня в мире эксплуатируется 430 энергетических ядерных реакторов с установленной мощностью 338,8 ГВт.

К созданию собственных атомно-энергетических систем активно приступили Индия, Мексика, Пакистан, Бразилия, Китай [1]. По данным

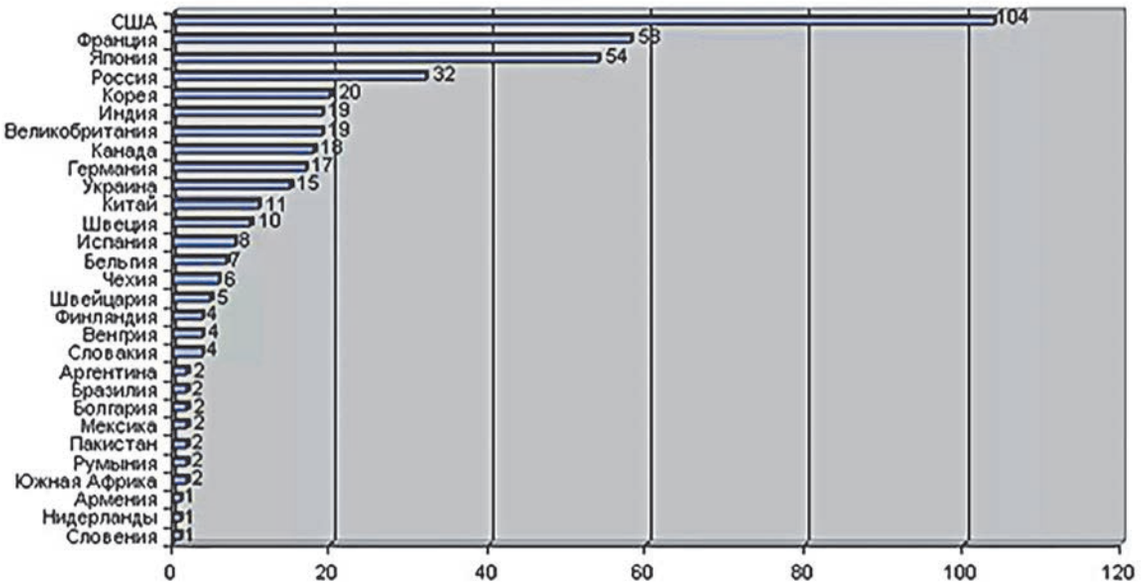

Рис. 1.
Количество действующих реакторов в мире

Всемирной ядерной ассоциации (*World Nuclear Association*), общее количество действующих реакторов в мире к 2032 г. составит 650 единиц. По прогнозам, потребность реакторов в ядерном топливе в мире к 2032 г. увеличится до 98–136 тыс. т по сравнению с 63,875 тыс. т в 2010 г. [5]. По-видимому, атомная энергетика окажется экономически и экологически перспективным видом энергопроизводства, ее роль в мировом энергетическом балансе будет возрастать.

Проблема обеспечения атомной энергетики расщепляющимися ядерными материалами – сложная и многоплановая. В настоящее время в качестве такого материала используется исключительно уран, причем расход природного урана на производство 1 ГВт/год энергии относительно велик (150–200 т).

На АЭС энергоотдача единицы массы топлива в 100 000 раз больше, чем на угольных ТЭС. Блок АЭС мощностью 1 млн кВт потребляет в год 30 т ядерного топлива со средним содержанием урана-235 – 3,33%. Для работы ТЭС такой же мощности требуется 3 млн т/год угля, то есть 60 000 вагонов в год [6]. В России около 40% всех перевозок железнодорожного транспорта приходится на транспортировку угля. Об экономичности и экологической чистоте АЭС убедительно говорит опыт Франции. На встрече в торговой палате в Москве в конце 1990-х гг. представитель французской энергетической компании заявил: «Работа в течение 10 лет 34 реакторов мощностью 900 МВт каждый сэкономила для Франции не менее 150 млрд франков и предотвратила выбросы в атмосферу опасных для здоровья высокотоксичных веществ: 10,3 млн т оксидов серы, 3,5 млн т оксидов азота, 0,4 млрд т углекислого газа и 1 млн т золы и пыли» [4]. По оценке, эксплуатация АЭС мира в 2001 г. была эквивалентна снижению выбросов углекислого газа в размере 2,7 млрд т, что составляет около 10% ежегодной эмиссии этого загрязнителя атмосферы. Одновременно на 2 млрд т снижается расход кислорода на сжигание топлива. Высокая энергоемкость атомного топлива позволяет строить АЭС в местностях, удаленных от месторождений органического топлива.

Очевидно, что значение атомной электроэнергетики в будущем должно возрастать, а значит, потребуется применение и дальнейшее развитие эффективных методов поиска, разведки и разработки месторождений урана.

На ***рис. 2*** приведены данные мировых запасов урана по цене 40 долл/кг – более 70% самых дешевых запасов сосредоточено в Австралии, Казахстане, России и Канаде.

Если рассмотреть распределение запасов урана (цена менее 40 долл/кг) по промышленным типам месторождений, то в месторождениях песчаникового типа и в калькретах (мелкозернистые и тонкозернистые пористые породы) сосредоточено 35% урана, в месторождениях типа несогласия – 34% урана, в золотых и меднозолотых месторождениях с попутной добычей урана – 19,6%, в гранитах месторождения Россинг – 5,1%, в жильных и штокверковых гидротермальных месторождениях – 3,4%. Интересно отметить, что почти 90% урана сосредоточено в трех типах месторождений, причем только для одного из них (месторождения типа несогласия) характерны высокие содержания урана (более 1%), а для двух других – низкие (менее 0,1%) [6].

Рис. 2.
Распределение мировых запасов урана по странам (2015–2016 гг.)

Около двухсот известных урановых и ураносодержащих минералов представлены оксидами, силикатами, титанатами, титанотанталониобатами, фосфатами, арсенатами, ванадатами, карбонатами, сульфатами, молибдатами, наиболее распространенные – уранинит, настуран, коффинит, урановые черни.

Наименее трудоемкий процесс – добыча руды из россыпных месторождений (золотоносные пески, монацитовые пески). Для разработки коренных месторождений, в зависимости от характера залегания рудного тела, создаются рудники:

– открытые (карьеры);

– подземные, в том числе рудники-штольни, в которых разрабатываемый пласт соединяется с дневной поверхностью наклонной или горизонтальной выработкой, рудники-шахты, где пласт соединяется с поверхностью вертикальной выработкой. Основной метод добычи коренных руд – буровзрывной. С помощью перфораторов в горной массе бурятся шпуры для закладки зарядов, производится подрыв пласта, затем, после проветривания забоя – погрузка горной породы.

Следует принять во внимание высокую стоимость и негативные экологические последствия таких методов разработки: радиоактивное загрязнение окружающей среды продуктами распада ураносодержащих минералов, пылевое загрязнение, опасность завалов. Для разработки инфильтрационных месторождений песчаникового типа с небольшими концентрациями урана на тонну горной породы такие методы крайне нерентабельны и малоэффективны.

Для разработки месторождений урана инфильтрационного типа применяется метод подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), который не требует поднятия руды на поверхность, избирательный перевод ионов природного урана в продуктивный раствор происходит непосредственно в недрах. Выщелачивание – сложный гетерогенный процесс взаимодействия растворенных реагентов с твердым веществом – рудой. Чаще всего используется серная кислота – самая распространенная, самая дешевая,

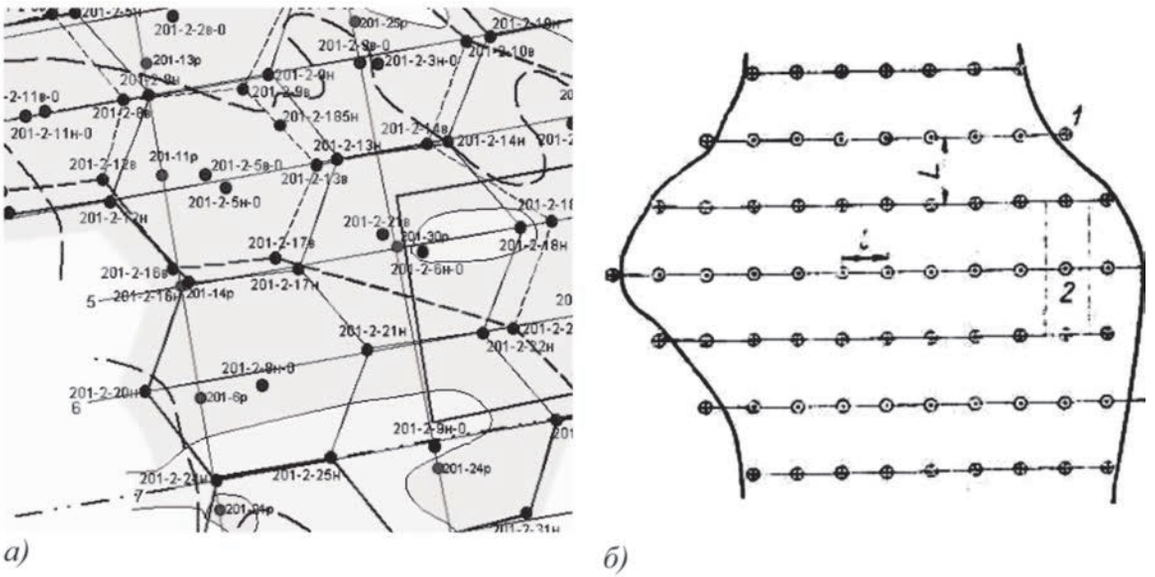

Рис. 3.
План технологического блока 201-2 (Восточный Мынкудук, Республика Казахстан): а – гексагональные ячейки разработки блока, в центре ячеек гексагональной формы расположены откачные скважины, в углах ячейки – закачные скважины; б – рядовая схема отработки, закачные и откачные скважины чередуются

малолетучая. Скорость выщелачивания (оценивается по количеству вещества, переходящего в раствор в единицу времени) зависит от типа вскрываемых минералов, вида и концентрации выщелачивающего реагента, температуры, величины удельной поверхности вскрываемого минерала, характера вкрапленности, интенсивности перемешивания.

Метод ПСВ отличается высокой экологической безопасностью, низкими затратами и упрощенностью технологических операций [3]. Это процесс замкнутого цикла, включающий в себя бурение скважин, установку технического оборудования и сооружение технологического полигона. В зависимости от условий разработки могут применяться различные схемы расположения скважин, например, гексагональная – с одной центральной откачной скважиной и шестью закачными (***рис. 3***).

В сеть закачных скважин закачивается кислотный раствор невысокой концентрации (5–15%), который смешивается с грунтовыми водами. Проходя через рудоносный горизонт, выщелачивающий раствор окисляет и растворяет урановые минералы. Соединения урана хорошо реагируют с кислотой, и в дальнейшем уран переходит в так называемую подвижную форму в виде соединений аквакомплексов. Затем продуктивный раствор поднимается на поверхность через откачные скважины и проходит процесс сорбции и десорбции в ионообменных колоннах. После извлечения соединений урана из растворов кислота может быть вновь закачана в скважины для повторного цикла выщелачивания и извлечения урана.

В последнее время добыча урана методом ПСВ развивается быстрее традиционных методов добычи, таких как открытые или закрытые рудники и выработки. Удельный объем добычи урана при помощи ПСВ возрастает – 20% мирового объема урана добывается этим способом. Капитальные затраты при организации ПСВ в 2–4 раза ниже, чем при горной добыче открытым или закрытым способ и дальнейшей переработке руды на гидрометаллургических заводах (ГМЗ). Доля амортизационных отчислений в себестоимости на ГМЗ составляет порядка 30–35%, при ПВ – лишь 18–23%. Таким образом, удельная себестоимость добычи одной тонны урана при подземном выщелачивании на 20–25% ниже, чем при горной добыче и переработке руды на ГМЗ [6]. Это позволяет перерабатывать с помощью ПСВ бедные руды с содержанием урана 0,01–0,03%, по отношению к которым горные работы нерентабельны.

При использовании ПСВ отпадает необходимость борьбы с сильным радиоактивным пылевым загрязнением и вредными газами, т.к. резко сокращается объем выбросов в атмосферу опасных веществ. Полностью исключается применение тяжелой горной техники для выемки, транспортировки больших объемов горных пород, их дробления и обогащения. Из оборудования необходимы только буровые станки, обсадные трубы, трубопроводы и насосы. От-

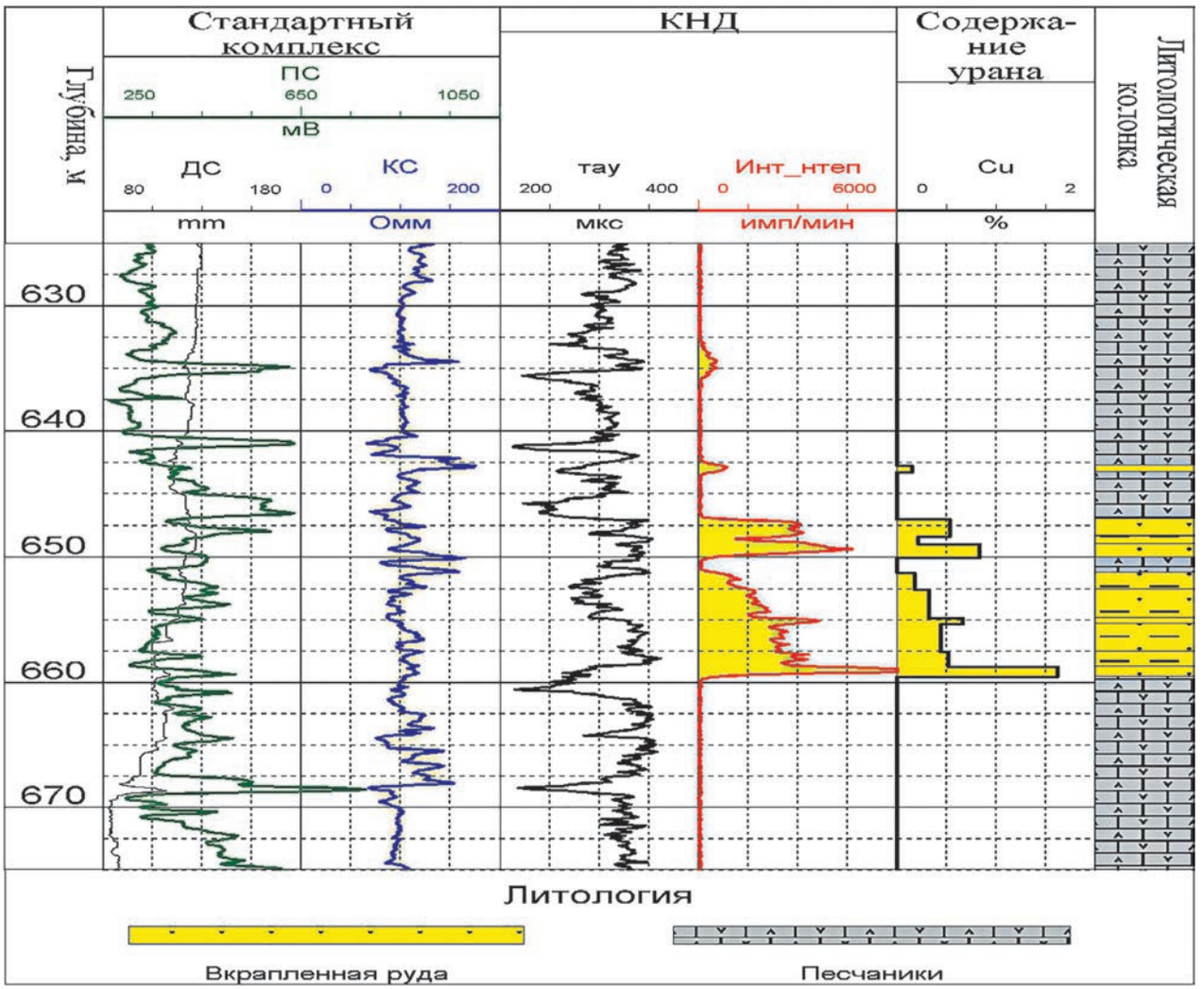

Рис. 4.
Пример использования КНД на одном из месторождений для прямого определения массовой доли урана с учетом влияния водородосодержания среды

сутствуют огромные отвалы пустых пород и забалансовых руд, хвостохранилища. Сокращается воздействие на персонал α- и β- излучения, крайне опасного γ-излучения, т.к. радиоактивные элементы и продукты их распада, на которые приходится 98% γ-излучения уранового семейства, остаются под землей.

Следует отметить, что при разработке месторождений методом ПСВ возникают определенные проблемы – уменьшение проницаемости пластов, кольматация откачных и закачных скважин, падение показателей добычи.

Следует также принять во внимание, что использование метода ПСВ требует особых геолого-технологических условий месторождения. ПСВ возможно лишь в том случае, когда рудная зона находится в проницаемых пластах, в которых кислотный агент может свободно перетекать от скважины к скважине, а также – при наличии флюидоупоров. Поэтому на месторождения в коренных непроницаемых горных породах применение ПСВ невозможно.

Использование чистой и рентабельной технологии ПСВ невозможно без применения современных геофизических методов разведки и подсчета запасов урановорудных залежей, а также геотехнологических методов контроля за разработкой. Для выделения рудных залежей, а также количественной и качественной оценки продуктивных пластов применяются электрические геофизические методы, такие как метод самопроизвольной поляризации (ПС), кажущегося сопротивления (КС), боковое каротажное зонирование (БКЗ), которые позволяют уточнить литологический разрез в скважине, выделить водоупоры и продуктивные горизонты, оценить фильтрационные свойства вмещающих и рудных горных пород.

Широко применяются ядерные методы каротажа – нейтронный каротаж (НК), гамма-ка-

ротаж (ГК), каротаж деления нейтронов (КНД), которые позволяют выделить рудные интервалы в разрезе скважины на основании повышенной естественной радиоактивности ураносодержащих минералов, определить мощность этих залежей.

Применение метода подземного скважинного выщелачивания в комплексе с современными геофизическими и геотехнологическими методами позволяет эффективно и рентабельно добывать уран на месторождениях с низкой его концентрацией. Новые методы позволяют значительно увеличить балансовые запасы полезных ископаемых по сравнению с геологически разведанными и подсчитанными по критериям для их обычной разработки. Экологически чистая технология ПСВ не требует затрат, направленных на рекультивацию и очистку опасных отвалов переработанных горных пород, избавляет от необходимости строительства хвостохранилищ. Все эти преимущества вкупе дают возможность добычи урана по конкурентоспособной низкой цене, что позволяет горнодобывающим компаниям выйти на международный рынок, погасить спрос на уран, необходимый для строительства атомных электростанций.

Литература

1. Бровин К.Г., Грабовников В.А., Шумилин М.В., Язиков В.Г. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием. Алматы: Гылым. 1997. 384 с.
2. Демехов Ю.В. Каротаж нейтронов деления (КНД-М) при разведке и эксплуатации месторождений урана гидрогенного типа: дис. ...канд. геол-мин. наук. Екатеринбург, 2013. 221 с.
3. Калабин А.И. Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием и другими геотехнологическими методами. М.: Атомиздат. 1981.
4. Левченко Н. Положительная динамика атомной отрасли России //Бюллетень по атомной энергии. 2003. № 6.
5. Ренейский А. Ядерная энергетика: состояние и перспективы //Бюллетень по атомной энергии. 2003. № 6.
6. Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана: Учебное пособие для вузов. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ. 2005.

UDC 622.775

A.V. Chekulaev, Post–graduate Student, department of geophysics of Saint–Petersburg Mining University[1], alexchekulaev09@yandex.ru

[1]2, 21 line, Vasilievsky Ostrov, St. Petersburg, 199026, Russia

Modern Technologies in Exploration and Development of Uranium Deposits for Nuclear Energetics

Abstract. In this article represented comparison of alternative energy sources which are differ than hydrocarbons. Also prospects for the application and development of nuclear energy are discussed, with the application of modern methods and technologies used for the exploration and uranium extraction as an energy source for nuclear power plants.

Keywords: energy sources; nuclear power; exploration and development methods; uranium mining; in situ leach.

References

1. Brovin K.G., Grabovnikov V.A., Shumilin M.V., Iazikov V.G. *Prognoz, poiski, razvedka i promyshlennaia otsenka mestorozhdenii urana dlia otrabotki podzemnym vyshchelachivaniem* [Forecast, prospecting, exploration and industrial evaluation of uranium deposits for underground leaching]. Almaty, Gylym Piubk., 1997, 384 p.
2. Demekhov Iu.V. *Karotazh neitronov deleniia (KND-M) pri razvedke i ekspluatatsii mestorozhdenii urana gidrogennogo tipa. Diss. kand. geol-min. nauk* [Logging of fission neutrons (CND-M) in the exploration and exploitation of uranium deposits of hydrogenic type. PhD Diss.]. Ekaterinburg, 2013, 221 p.
3. Kalabin A.I. *Dobycha poleznykh iskopaemykh podzemnym vyshchelachivaniem i drugimi geotekhnologicheskimi metodami* [Extraction of minerals by underground leaching and other geotechnological methods]. Moscow, Atomizdat Publ., 1981.
4. Levchenko N. *Polozhitel'naia dinamika atomnoi otrasli Rossii* [Positive dynamics of the nuclear industry in Russia]. *Biulleten' po atomnoi energii* [The Bulletin on Atomic Energy], 2003, no. 6.
5. Reneiskii A. *Iadernaia energetika: sostoianie i perspektivy* [Nuclear energy: state and prospects]. *Biulleten' po atomnoi energii* [The Bulletin on Atomic Energy], 2003, no. 6.
6. Turaev N.S., Zherin I.I. *Khimiia i tekhnologiia urana* [Chemistry and Technology of Uranium]. Moscow, TsNIIATOMINFORM Publ., 2005.