

УДК 552.579:553.072:553.044 (470.23:474)

В.И. Вялов¹, А.Х. Богомолов², В.А. Михайлов³, Е.В. Семенов⁴**УРАНОНОСНОСТЬ ДИКТИОНЕМОВЫХ СЛАНЦЕВ
КАЙБОЛОВО-ГОСТИЛИЦКОЙ ПЛОЩАДИ
ПРИБАЛТИЙСКОГО БАСЕЙНА (ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Приведены результаты исследований ураноносности диктионемовых сланцев Кайболово-Гостилицкой площади Прибалтийского бассейна сланцев и фосфоритов (Ленинградская область). Выявлены особенности уранового оруденения по площади и в стратиграфическом разрезе отложений пакерортского раннеордовикского горизонта. Определено высокое содержание урана в пласте диктионемовых сланцев, установлены корреляционные связи урана с другими элементами, описаны вероятные условия уранового рудогенеза, оценены прогнозные ресурсы урана в рамках изученной площади.

Ключевые слова: диктионемовые сланцы, уран, органическое вещество, условия уранового рудогенеза, прогнозные ресурсы урана.

The results of researches on uranium of Dictyonema shale of the Kajbolovo-Gostilitsky area of Baltic basin of shale and phosphorites (Leningrad region) are presented. Features uranium ore on the area and in sedimentary rock sequence of Pakerort horizon of early Ordovician Period are revealed. High concentrations of uranium in a layer of Dictyonema shale are determined, correlation of uranium with other elements are defined, probable conditions uranium ore genesis are described, look-ahead resources of uranium within the limits of the studied area are estimated.

Key words: dictyonema shale, uranium, organic matter, conditions of uranium genesis, probable resources of uranium.

Введение. Диктионемовые сланцы (ДС) Прибалтийского бассейна — потенциальное энергетическое низкосортное топливо (теплота сгорания около 1000 ккал/кг, выход смолы около 3%), а также нетрадиционный рудный тип минерального сырья, бедная (так называемая убогая) руда урана. Несмотря то что во ВНИИХТ была разработана и неоднократно совершенствовалась промышленная технология извлечения из них урана, диктионемовые руды не отрабатываются из-за низкого выхода урана, требований к экологии производства и наличия месторождений с более богатыми рудами. В последние годы максимально раскрыт уникальный комплексный характер ДС — наличие в них дефицитных рассеянных (Re, Sc, Rb, Cs), редкоземельных, цветных (кроме известных V, Mo, еще Zn, Cu) и благородных (Au, металлы платиновой группы) металлов на уровне минимальных значений концентрации в промышленных типах руд [Вялов и др., 2010, 2013]. Возрастающий год от года дефицит многих из вышеуказанных металлов делает актуальным вопрос комплексной переработки металлоносных ДС в ближайшей перспективе на основе подхода к ним как к полиметалльному

сырью и с применением высокоселективных гидрометаллургических методов. При исследовании металлоносности ДС на новом аналитическом и научном уровнях следует вновь обратиться к их ураноносности, несмотря на длительную историю поисков урана в Прибалтийском бассейне. Уран в ДС — главное рудное полезное ископаемое (большие природные ресурсы ДС определяют огромные запасы урана даже при невысоком его содержании в сырье), а остальные металлы — попутные компоненты. Возвращение к исследованию урана в ДС произошло в 2012–2014 гг., когда ФГУП «ВСЕГЕИ» проводило поисковые работы на рений и сопутствующие ему металлы в диктионемовых сланцах и фосфоритах на Кайболово-Гостилицкой площади (Ленинградская область).

Геологическая характеристика объекта и его изученность. ДС входят в состав нижнеордовикских отложений Русской плиты, перекрывающих южный склон кристаллических пород Балтийского щита. ДС являются составной частью отложений пакерортского горизонта. В его нижней части развиты разнотекстурные кварцевые песчаники, мощностью 1–16 м. Они содержат мелкие об-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих полезных ископаемых, докт. геол.-минерал. н., профессор; ФГБУ «ВСЕГЕИ», отдел геологии горючих полезных ископаемых, зав. отделом; *e-mail:* Vladimir.Vyalov@vsegei.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих полезных ископаемых, канд. геол.-минерал. н., доцент; *e-mail:* nvprncl@geol.msu.ru

³ ФГБУ «ВСЕГЕИ», отдел геологии урановых месторождений и радиоэкологии, ст. науч. с.; *e-mail:* Vitaly_Mikhailov@vsegei.ru

⁴ ФГБУ «ВСЕГЕИ», аспирант; *e-mail:* playy@list.ru

ломки фосфатизированных раковин брахиопод *Obolus*, это так называемые оболочевые песчаники, или фосфориты, поскольку представляют собой объект промышленной добычи фосфатного сырья на некоторых месторождениях. Залегают оболочевые песчаники на размытой поверхности нижнекембрийских осадочных отложений (на кварцевых песчаниках и синих глинах). На фосфатоносных песчаниках залегают породы пачки переслаивания — мелкозернистые песчаники и алевролиты с примесью граптолитов и оболочевых раковин, горизонтальнослоистые аргиллиты с остатками водорослей *Dictionema*. На границе пород пачки переслаивания и оболочевых песчаников нередко развиты прослой и линзы пирита. Выше пачки переслаивания расположены собственно ДС, которые имеют переменную мощность (до 6 м). ДС — сравнительно однородная порода по минеральному составу и содержанию органического вещества (ОВ до 8–15%). ОВ представлено остатками диктионем и низших водорослей. Органогенные образования из обломков спикул губок встречаются редко. Минеральный состав ДС (%): кварц 60–74, калиевый полевой шпат (санидин) (8–15), редко присутствуют микроклин, мусковит (2–8), хлорит (2–4), а также тонкодисперсные пирит (3–8), марказит (3) в прослоях и конкрециях (в нижней и средней частях пласта ДС); акцессории — апатит, циркон, рутил, монацит и др. Присутствуют антраколит (конкреции) и, в незначительном объеме — рудные минералы (галенит, сфалерит, молибденит, настуран и др.).

Пачка переслаивания и собственно ДС образуют сланцевый горизонт, единый пласт ДС мощностью до 8 м. В районе ордовикского глинта ДС выходят на поверхность, а на 22–25 км южнее они зафиксированы в скважинах на глубине около 100 м, еще южнее выклиниваются. Пласт ДС перекрывается глауконитовыми песчаниками нижнеордовикской волховской свиты.

На территории Прибалтийского бассейна сланцев и фосфоритов поиски урана в промышленной концентрации в ДС проводились с середины 1940-х до начала 1960-х гг. Изучался литологический состав ДС, содержание и распределение урана, формы его нахождения, подсчитывались запасы урана. По результатам поисковых работ на уран в Ленинградской области выделено 5 участков в ранге месторождений непромышленных руд с запасами урана (тыс. т): Котловское — 6,2; Ранноловское — 2; Кайболовское — 5,7; Куммолдовское 57,96; Красносельское 13,07. Эти месторождения расположены в западной части Ленинградской области между пос. Куммоллово, Копорье — Красное Село. Наряду с ураном в повышенной концентрации в ДС отмечались молибден (0,02%), ванадий (0,09%) и никель (0,015%), для этих металлов также подсчитывались запасы. Установлено неоднородное распределение урана в диктионемовых

сланцах не только в вертикальном разрезе, но и по падению и простиранию пласта. Наибольшее количество урана по разрезу пласта ДС сосредоточено в пачках с максимальным содержанием ОВ. Увеличение содержания урана наблюдается в маломощных прослоях неслоистых аргиллитов. По падению наблюдается увеличение концентрации урана в пласте ДС при сокращении мощности пласта. Формы нахождения урана — в виде настурана до 10% от общего количества в ДС, в составе ОВ до 30%, он предполагается в существенном количестве (30–40%) даже в силикатном и фосфатном веществе ДС [Альтгаузен и др., 1967; Альтгаузен, 1992; Давыдова, Гольдштейн, 1967; Михайлов и др., 2006].

В 2009 г. в Отделе геологии горючих полезных ископаемых ВСЕГЕИ были возобновлены работы по изучению металлоносности диктионемовых сланцев в Ленинградской области, в процессе которых подтверждена их высокая ураноносность, а также обнаружена специализация на большую группу редких металлов [Вялов и др., 2010]. Вследствие дефицита рения в 2012–2014 гг. проведены поисковые работы на рениевое оруденение в пределах Кайболово-Гостилицкой площади Ленинградской области, которые сопровождались бурением 5200 м в 96 скважинах. Проводился отбор керновых проб ДС, выполнены аналитические исследования определения содержания в них рудных элементов, в том числе урана. Изучался петрографический и геохимический состав диктионемовых сланцев, их металлоносность. Уже в начале поисковых работ было подтверждено высокое содержание U, Mo, V, установлено наличие Re, Rb, Cs, Sc; Cu, Zn, W; Pt, Pd, Rh на промышленном уровне, опубликованы предварительные результаты работ [Вялов и др., 2013].

Методика исследований. Собрана, обобщена, систематизирована, комплексно проанализирована и переинтерпретирована геолого-геохимическая информация об уране в ДС Прибалтийского бассейна (Ленинградская область). Выполнен геологический, формационный и минерагенический анализы; пробурены поисковые скважины по профилям на Кайболово-Гостилицкой площади (около 600 км² в районе п. Копорье); опробованы диктионемовые сланцы и фосфориты Прибалтийского бассейна (бороздовые пробы отбирались из керны скважин с интервалом через 0,5 м); выполнены лабораторно-аналитические исследования (анализы на уран — методом масс-спектрометрии в ЦЛ «ВСЕГЕИ»). Проанализировано 580 бороздовых проб ДС. Проведена математическая обработка первичных данных, созданы графические материалы, совершенствовались методы оценки прогнозных ресурсов редких элементов (в соответствии с действующими методическими руководствами по оценке прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых и классификацией запасов

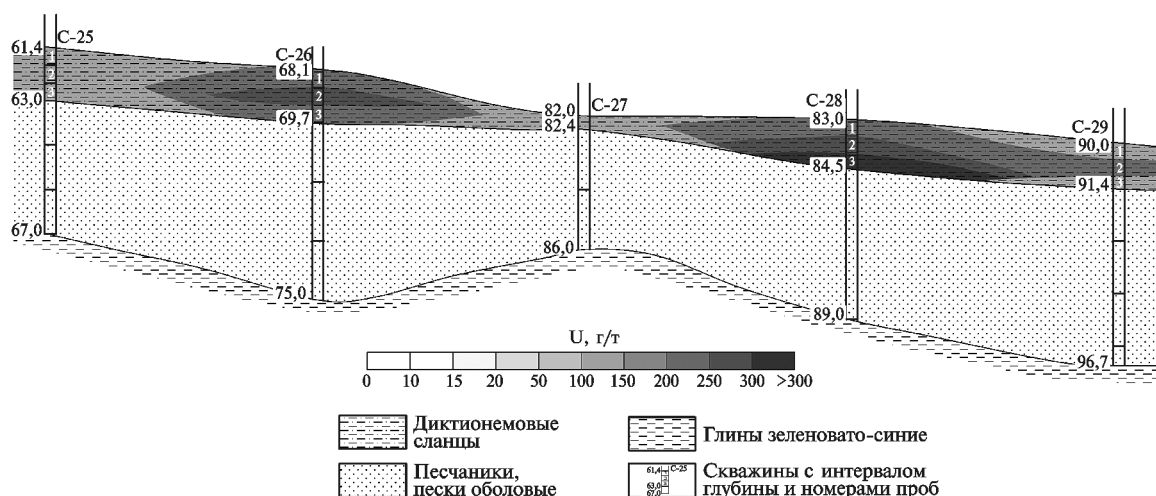


Рис. 1. Распределение урана в разрезе по профилю скважин № С-25–С-29

месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых).

Результаты исследований и их обсуждение. Уран является основным рудным элементом в веществе пласта ДС. Его концентрации в бороздовых пробах колеблются в широких пределах от 7,4 до 1130 г/т, среднее содержание по скважинам — от 7,4 до 880 г/т. По результатам корреляционного анализа (выборка 580 проб) уран взаимосвязан с макроэлементами — с Al (коэффициент корреляции 0,53), K (0,49), Ba (0,49), Na (0,37), Mg (0,28), Fe (0,28). Содержание урана имеет отрицательную корреляцию с Si (–0,38): увеличение доли преобладающего в составе ДС кварца ведет к уменьшению количества органического вещества — концентратора урана. Большая роль ОВ проявлялась как в результате прижизненного накопления металла (и многих других микроэлементов) синезелеными водорослями, так и последующей сорбции урана (и многих других металлов) отмершим ОВ в донных осадках [Неручев, 2007]. Соответственно, уменьшение количества ОВ приводит к снижению концентрации урана. Корреляция содержания урана с Са отрицательна (–0,28), а также с Mn (–0,32) и Р (–0,1). Поэтому как силикатное, так и фосфатное вещество ДС не может содержать уран в значительном количестве, щелочные условия среды вряд ли способствовали осаждению урана. Под электронным микроскопом с микрозондом обнаружены мелкие (несколько микронов) зерна настурана [Вялов и др., 2013]. В иловых водах палеобассейна древнего осадконакопления явно существовала восстановительная сероводородная обстановка, о чем свидетельствует наличие в ДС железа, серы (до 3% и более), ОВ (около 10%), благоприятная для осаждения многих элементов в сульфидной форме и восстановления шестивалентного урана.

Действительно, уран интенсивно коррелирует с целым рядом металлов (r): с цветными — V

(0,74), Mo (0,6), Cr (0,55), Ti (0,55), Sb (0,5), Cu (0,4), Ni (0,39); редкими и рассеянными — Sc (0,6), Ga (0,54), Rb (0,53), Cs (0,53), Re (0,47), благородными — Ag (0,63), Rh (0,33), Pt (0,3). Это обусловлено и общностью их источника — морской воды, в которой растворены многие элементы. Источником урана в ДС М.Н. Альтаузен [1992] считал именно морскую воду, куда уран попадал из области сноса. Вероятна и общность механизма связывания металлов ОВ — прижизненное накопление их микроорганизмами и сорбция на ОВ, как отмечено выше. Процессы накопления урана и других ценных металлов в осадках будущих ДС в пакерортское время происходили в заливо-проливобразном морском бассейне с нормальной соленостью в мелководных условиях. В области сноса преобладали кислые магматические образования Балтийского щита — источники урана и многих других металлов [Вялов и др., 2013].

Установлена обогащенность пласта диктионемовых сланцев ураном вплоть до минимально-промышленного уровня (300 г/т и более). Уран приурочен к неслоистым аргиллитам с высоким содержанием ОВ. При сокращении мощности пласта ДС до 1 м и менее происходит увеличение концентрации урана до ≥ 250 –350 г/т, в скважине 59 — ≥ 436 г/т (среднее по скважине). Неоднородность распределения урана проявлена также по простиранию пласта. Распределение урана в разрезе по профилю скважин № С-25–С-29 показано на рис. 1. Наиболее высокое содержание урана в пласте ДС приурочено к его середине или к собственно ДС, сложенным неслоистыми аргиллитами. Содержание урана в этих прослоях пласта часто превышает 300 г/т. В некоторых скважинах отмечены интервалы разреза мощностью 0,5 м с концентрацией его более 500 г/т. Наименее обогащены ураном породы пачки переслаивания, где содержание урана колеблется от 7 до 90 г/т и

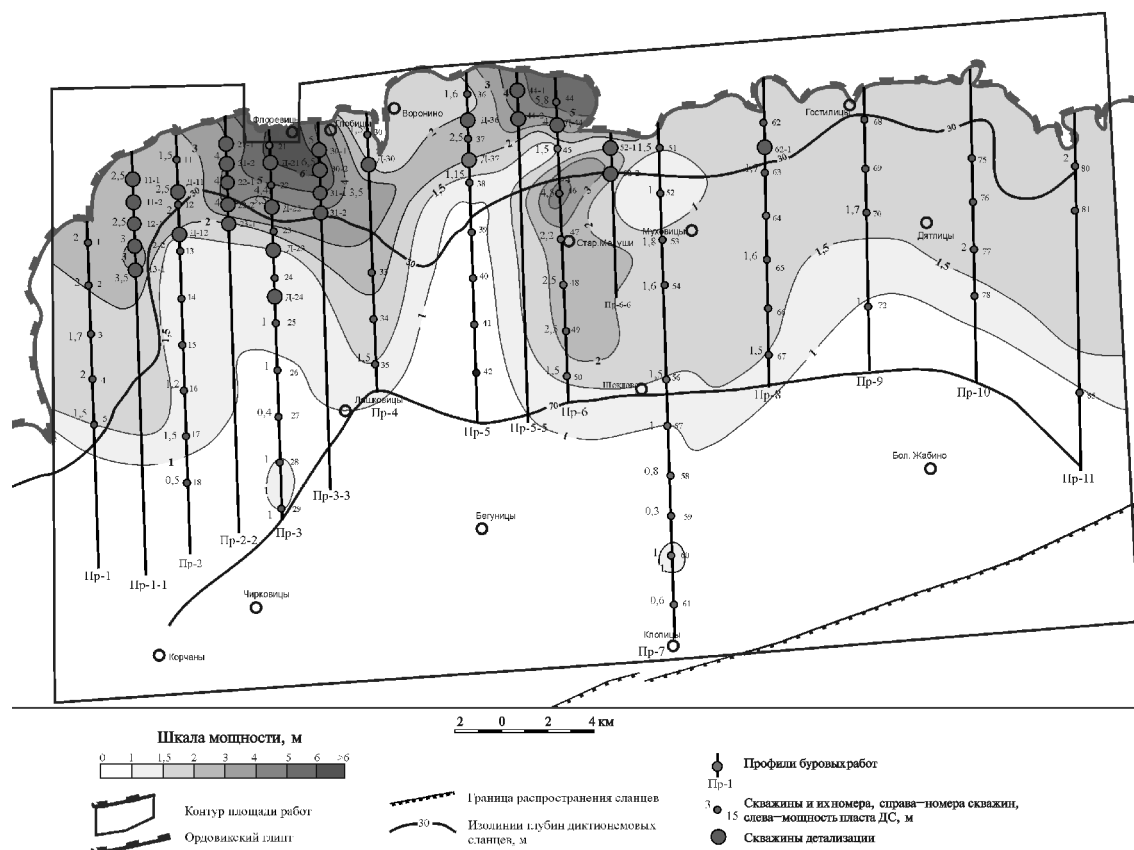


Рис. 2. Мощность продуктивного горизонта пласта ДС по площади

зависит от соотношения в пачке переслаивания прослоев песчаников и аргиллитов. При значительной мощности пачки переслаивания среднее содержание урана в целом по сланцевому горизонту (собственно ДС в верхней–средней частях пласта + пачка переслаивания в нижней части) заметно снижается.

Для сравнения отметим, что в залегающих под пачкой переслаивания пласта ДС оболочках песчаников содержание урана обычно составляет 10–15 г/т (рис. 1), видимо, вследствие практического отсутствия в них ОВ и несколько иных условий осадконакопления.

Почти в половине бороздовых проб из скважин, пройденных на Кайболово-Гостилицкой площади, зафиксировано содержание урана ≥ 300 г/т. Подобные значения концентрации учитываются в качестве забалансовых руд, балансовая рудная концентрация (≥ 500 г/т) выявлена в 10% проб. Мощность интервалов с такими величинами — 0,5, редко 1 м. Поэтому на Кайболово-Гостилицкой площади установлена не только высокая ураноносность диктионемовых сланцев, но и оценены прогнозные ресурсы (ПР) урана. Их можно квалифицировать по категориям P_3 – P_2 , учитывая основную сеть поискового бурения 2×4 км, а на участке детализации — 1×2 км, а также наличие технологии извлечения урана из углерод-

кремнеземистых черносланцевых руд [Патент РФ № 2477327, 2013].

Среднее содержание урана на поисковой площади по всему пласту ДС, включая пачку переслаивания, составляет 174 г/т. Средняя мощность пласта ДС на территории исследований 3,44 м. Площадь поискового бурения 593,4 км². Принимая во внимание равномерную сеть опробования и явный стратиформный тип распределения урана, при этих параметрах и с учетом удельного веса ДС (2,403 г/см³) прогнозный потенциал урана на Кайболово-Гостилицкой поисковой площади в пласте ДС составит 853,5 тыс. т.

Рационально оценить ПР урана в так называемом продуктивном на уран горизонте пласта ДС (в собственно ДС, без пачки переслаивания). В таком случае мощность ДС снижается (рис. 2), а средняя концентрация урана, как в общем для ДС, так и по скважинам, заметно повышается (по сравнению с содержанием его в пласте ДС с пачкой переслаивания). Распределение урана в продуктивном горизонте ДС по площади приведено на рис. 3.

В таблице приведены основные показатели продуктивного горизонта пласта диктионемовых сланцев и прогнозные ресурсы урана как для всей поисковой площади, так и для участка детализации (с сетью скважин 2×1 км).

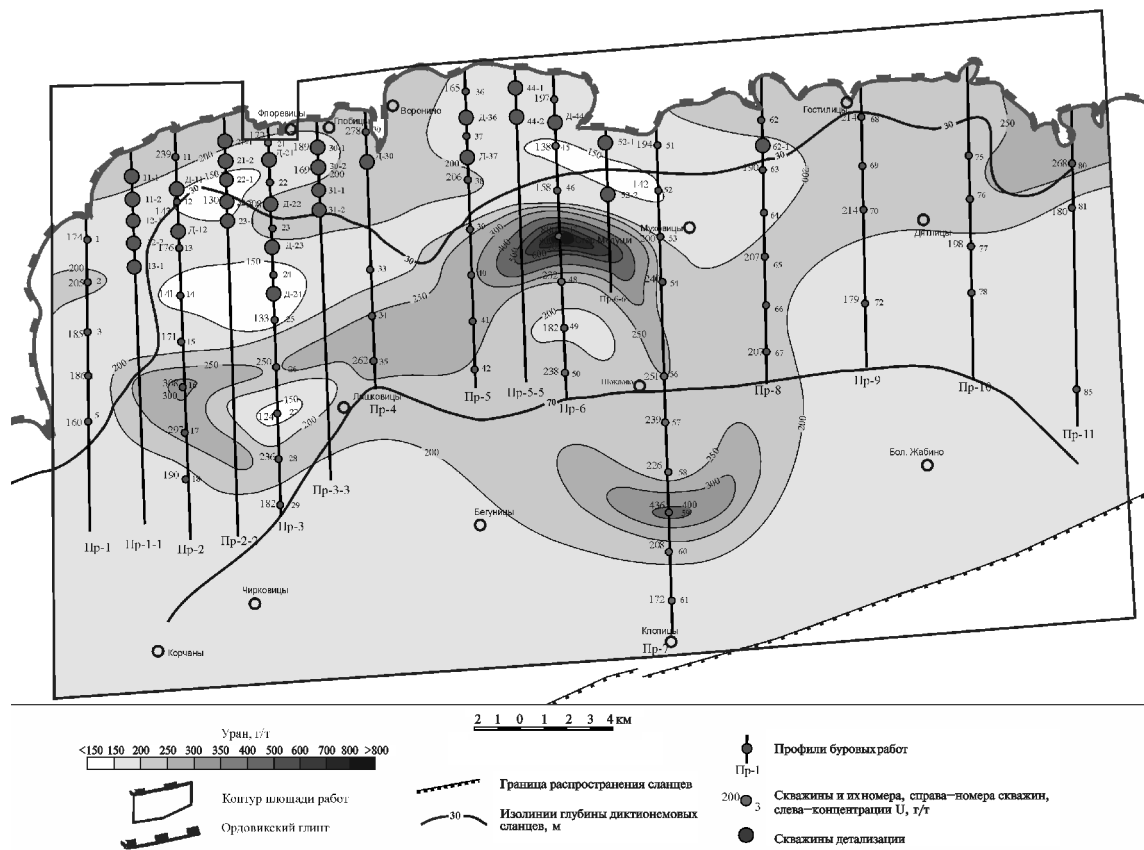


Рис. 3. Распределение урана в продуктивном горизонте ДС по площади

Показатели продуктивного горизонта пласта диктионемовых сланцев и прогнозные ресурсы урана

Показатели	Вся площадь	Участок детализации (рис. 1, участок № 8)
Площадь, S , км ²	593,4	46,6
Мощность продуктивного горизонта ДС, м	1,8	3,60
Удельный вес, г/см ³	2,403	2,403
Среднее содержание урана, г/т	219,3	168,7
Прогнозные ресурсы урана для всей площади, тыс. т	630,82	
Прогнозные ресурсы урана для участка детализации по категории P_2 , тыс. т		68,02

Даже при необходимости ввода в расчеты поправочных коэффициентов — коэффициента достоверности (например, $k_1=0,7$) и коэффициента на новый тип оруденения (например, $k_2=0,5$), прогнозные ресурсы урана для Кайболово-Гостилицкой площади остаются весьма и весьма значительными и составляют от 220 тыс. т (в продуктивном горизонте ДС) до 300 тыс. т (включая пачку переслаивания). Это даже не крупное, а уникальное месторождение урана.

Закключение. В результате проведенных поисковых работ на Кайболово-Гостилицкой площади в

диктионемовых сланцах Прибалтийского бассейна установлена концентрация урана промышленного, балансового и забалансового уровней, что вновь подтвердило высокую ураноносность этих пород на территории Ленинградской области.

Ведущая роль в образовании уранового оруденения в ДС принадлежит органическому веществу и условиям древнего осадконакопления — формирование диктионемовых осадков происходило в условиях морского мелководья, в восстановительной сероводородной среде иловых вод.

Урановое оруденение носит выраженный стратиформный характер с широким распространением по площади развития пласта ДС. Средняя концентрация урана в пласте ДС возрастает с уменьшением его мощности до 1 м и менее.

Кайболово-Гостилицкая поисковая площадь представляет собой уникальное месторождение забалансовых (в настоящее время) урановых руд. Оно может сыграть большую роль в воспроизводстве минерально-сырьевой базы атомной промышленности при комплексном извлечении не только урана, но и V, Мо, РЗЭ [Патент РФ, 2013], а также Re, МПГ и других ценных металлов. Поэтому поисковым работам должны сопутствовать технологические исследования для комплексного извлечения урана и других ценных компонентов из ДС и фосфоритов пакерортского горизонта Прибалтийского бассейна. Необходимо продол-

жать исследования ураноносности и комплексной металлоносности ДС Прибалтийского бассейна, особенно на востоке территории Ленинградской области в междуречье Волхов–Сясь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альтгаузен М.Н., Гольдштейн Ц.Л., Давыдова Т.Н. Урановое оруденение Прибалтики // Месторождения урана СССР. Т. 2, вып. 1. Осадочные месторождения. М., 1967. С. 278–319.

Альтгаузен М.Н. Металлоносные черные сланцы венд-нижнепалеозойского возраста // Oil Shale — Горючие сланцы. Вып. 9/3. Таллин, 1992. С. 194–207.

Вялов В.И., Миронов Ю.Б., Нежинский И.А. О металлоносности диктионемовых сланцев Прибалтийского бассейна // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2010. № 5. С. 19–23.

Вялов В.И., Ларичев А.И., Балахонова А.С. Рудогенез диктионемовых сланцев и оболовых песчаников Прибалтийского бассейна // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 87–98.

Давыдова Т.Н., Гольдштейн Ц.Л. Основные закономерности распределения урана в диктионемовых сланцах

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.Н. Лодыгину за помощь в оформлении статьи.

Прибалтики // Месторождения урана СССР. Т. 2, вып. 1. Осадочные месторождения. М., 1967. С. 316–335.

Михайлов В.А., Чернов В.Я., Кушнеренко В.К. Диктионемовые сланцы Прибалтийского бассейна — перспективный объект промышленного освоения на уран и другие полезные ископаемые // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Информ. сборник. Вып. 149. М.: РИС ВИМС, 2006. С. 92–98.

Неручев С.Г. Уран и жизнь в истории Земли. СПб.: ВНИГРИ, 2007. 328 с.

Патент РФ № 2477327, 2013. Способ комплексной переработки углерод-кремнеземистых черносланцевых руд / Сарычев Г.А., Денисенко А.П., Смирнов К.М. и др.

Поступила в редакцию
01.02.2016