

РЕГИОНАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ НИГЕР

© 2022 В.Н. Глазнев^{1,2}, О.М. Муравина¹, И.А. Якуба¹

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394006;
e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

²Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, Россия, 184209

Поступила в редакцию 22.02.2022; после доработки 05.03.2022; принята в печать 27.03.2022

В работе рассматриваются методика и результаты прогнозирования месторождений урана песчаникового типа на территории Республики Нигер, основанные на использовании совокупности региональных геолого-геофизических материалов и новой технологии пространственного анализа данных методом группового учета аргументов. Кратко изложены необходимые сведения по генезису и локализации месторождений урана песчаникового типа на изучаемой территории. Приведены примеры выявления формальных геологических, тектонических и геофизических признаков, характеризующих размещение известных крупных объектов урановой минерализации. На примере эталонных рудных и заведомо безрудных объектов выполнен идентификационный анализ признаков, ориентированный на определение их совокупной информационной содержательности. Результаты идентификационного анализа позволили оценить веса используемых признаков и выполнить комплексное региональное прогнозирование урановых месторождений песчаникового типа на территории Республики Нигер. По результатам прогноза намечены три наиболее перспективных участка, на которых рекомендована постановка детальных работ по обнаружению промышленной урановой минерализации.

Ключевые слова: месторождения урана, анализ пространственных данных, комплексное прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

На территории Республики Нигер, площадь которой составляет более 1.2 млн. км², располагается примерно 9% мировых запасов урана, промышленная добыча которого ведется с 1971 г. (Dahlkamp, 1993; OECD & NEA, 2000). Наиболее крупные урановые месторождения региона Имурарен, Таза, Мадауэла, Арлит, Аката, Секирет, Афасто и Азелик (Kinnaird, Nex, 2016) расположены на западных склонах массива Аир, представляющего выступ докембрийского фундамента щита Туарег (Liegeois et al., 2005; Schluter, 2008; Thieblemont, 2016). Эти известные богатые месторождения урана локализованы в палеозойско-мезозойском платформенном прогибе Тим Мерсои и относятся к песчаниковому типу (Тарханов, Бугриева, 2012; Bowell, 2015; Kinnaird, Nex, 2016). На протяжении полувека на территории Республики Нигер продолжают работы по обнаружению месторождений, однако,

до настоящего времени геологическое строение региона изучено относительно слабо и весьма неравномерно, что и ограничивает возможности прямой локализации новых перспективных участков на обнаружение месторождений урана. Поэтому важной задачей для Республики Нигер является региональная оценка перспектив ураноносности территории, которая позволит локализовать поиски месторождений на наиболее перспективных участках.

Наши исследования по региональному прогнозированию месторождений урана на территории Республики Нигер, основанные на использовании совокупности региональных геолого-геофизических данных (Глазнев, Якуба, 2020, 2021; Глазнев и др., 2021) и новых технологиях пространственного анализа данных (Калинин, 2011; Муравина, 2009, 2012, 2013; Муравина и др., 2019а, 2021; Муравина, Пономоренко, 2016; Сорохтин и др., 2011; Carranza, 2002; Muravina et al., 2019а), нацелены на классификацию изучаемой

территории по признакам ураноносности и выявление областей, перспективных на урановое оруденение. Разумеется, такое прогнозирование, возможное только на вероятностном уровне, должно опираться на принятые эталоны месторождений региона и типовые геологические условия, благоприятные для формирования залежей урановых руд.

Рассмотрим более подробно исходные геолого-геофизические материалы для региональных прогнозных построений, особенности методики анализа пространственных данных и основные результаты по выявлению новых перспективных ураноносных областей и участков территории Республики Нигер, на которых, по нашему мнению, в дальнейшем следует сконцентрировать полевые геолого-геофизические исследования для обнаружения новых месторождений урана.

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА ПЕСЧАНИКОВОГО ТИПА

В геологическом отношении промышленные месторождения урана, расположенные на территории страны (рис. 1), по своему генезису относятся к инфильтрационному (пластово-инфильтрационному) типу (Бойцов, 1989; Тарханов, Бугриева, 2012; Dahlkam, 1993). Такие месторождения формируются в условиях аридного климата в пределах крупных осадочных бассейнов, выполненных терригенными континентальными и прибрежно-морскими формациями, толщи которых сложены чередованием водоупорных и водоносных горизонтов (Bowden et al., 1981; Cazoulat, 1985; Jaireth et al., 2008; Pagel, 2005; Rigault, 2010). В процессе гипергенеза ураносодержащие породы докембрийского гранитоидного комплекса щита Туарег, представленного на территории Республики Нигер

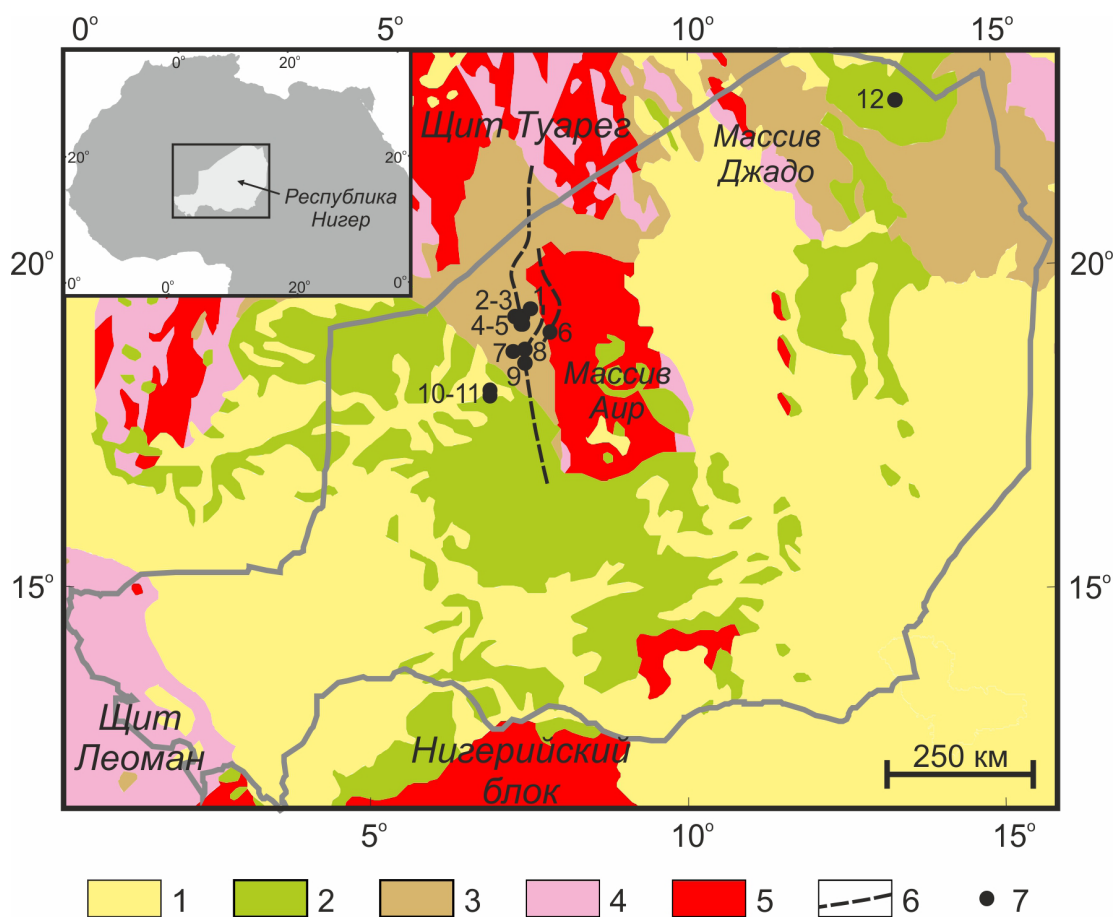


Рис. 1. Геологическая схема территории Республики Нигер и прилегающих стран по (Schluter, 2008; Thieblemont, 2016), и расположение месторождений урана на территории республики: 1 — кайнозой; 2 — мезозой; 3 — палеозой; 4 — протерозой; 5 — архей; 6 — система разломов Азау-Арлит; 7 — месторождения урана (1 — Арлит, 2–3 — Таза (Северное и Южное), 4–5 — Акаута (Акаута-1 и Акаута-2), 6 — Мадауэла, 7 — Афасто, 8 — Имурарен, 9 — Секирет, 10–11 — Азелик (Северное и Южное), 12 — Джадо).

Fig. 1. Geological scheme of the territory of the Republic of Niger and adjacent countries (Schluter, 2008; Thieblemont, 2016), and the location of uranium deposits on the territory of the republic: 1 — Cenozoic; 2 — Mesozoic; 3 — Paleozoic; 4 — Proterozoic; 5 — Archaean; 6 — Azau-Arlit fault system; 7 — Uranium ore deposits (1 — Arlit, 2–3 — Taza (North and South), 4–5 — Akouta (Akouta-1 and Akouta-2), 6 — Madouela, 7 — Afasto, 8 — Imouraren, 9 — Sekerit, 10–11 — Azelik (North and South), 12 — Djado).

массивами Аир и Джадо (Schluter, 2008), формировали кору выветривания, содержащую первичные руды соединений урана, окисленного до шестивалентного состояния (Mamadou et al., 2020). Легкорастворимые шестивалентные соединения урана выносились грунтовыми водами под действием гидравлического напора в прилегающие области осадочного бассейна, где на глубине, в условиях щелочной восстановительной обстановки, они восстанавливались до слабо растворимой четырехвалентной формы, образуя месторождения и рудопоявления (Billon, Patrier, 2019).

Собственно формирование месторождений происходит на геохимических барьерах (Кисляков, Щеточкин, 2000; Bohari et al., 2018), представляющих области резкой смены гидродинамических или физико-химических условий миграции рудоносных грунтовых вод. В этом процессе важную роль играют крупные разломы (Pagel, 2005), образующие локальные поднятия фундамента, вблизи которых в осадочном комплексе возникают благоприятные условия для формирования рудных полей и отдельных залежей урана. Приуроченность месторождений к синклинорным структурам чехла, ограниченным разломами фундамента субмеридианального и северо-западного простирания отмечается как важный генетический признак всеми исследователями (Тарханов, Бугриева, 2012; Billon, Patrier, 2019; Bohari et al., 2018; Cazoulat, 1985; Pagel, 2005; Sani et al., 2021). При этом характерной особенностью положения урановых месторождений является их пространственная удаленность от областей выхода гранитоидов докембрийского фундамента на расстояния до нескольких десятков километров. Отметим, что горизонтальные размеры линзовидных рудных залежей, например в Ахаггарском рудном поясе, достигают 5–8 км (Тарханов, Бугриева, 2012), при мощности до первых десятков метров и глубинах залегания тел в интервале от дневной поверхности до 500–800 м (Bowden et al., 1981; Bowell, 2015; Cazoulat, 1985; Croisy, 2013; Kinnaird, Nex, 2016; Pagel, 2005; Rigault, 2010).

Таким образом, приведенные геологические сведения позволяют охарактеризовать основные черты известных крупных урановых месторождений изучаемой территории, к которым относятся: геолого-тектонические особенности размещения урановых месторождений, пространственные соотношения исходных ураноносных геологических комплексов докембрия и современное положение пластово-инфильтрационных месторождений урана, глубина залегания месторождений в осадочном чехле. Все указанные признаки могут быть положены в основу регионального прогнозирования урановых месторождений песчаникового типа и на других частях территории Республики Нигер.

Геофизические материалы, используемые для регионального прогнозирования, должны, с одной стороны, отвечать требованиям, характеризующим опосредованные связи полей с геолого-тектоническими особенностями строения региона (Mints et al., 2020; Muravina et al., 2019b), а с другой стороны, обеспечивать наиболее полное покрытие изучаемой территории соответствующими данными об аномальных полях.

В качестве первичных геофизических данных были использованы региональные материалы гравиметрических и магнитных исследований изучаемой территории. Предложенная синтетическая модель гравитационного поля для территории Республики Нигер и прилегающих стран (Глазнев, Якуба, 2020; Yacouba, Glaznev, 2021), объединяющая данные наземной съемки (Rechenmann, Louis, 1966) и результаты спутниковых измерений для модели EGM2008 (Pavlis et al., 2012), характеризуется достаточной точностью данных и пространственной детальностью аномального поля. В качестве данных об аномальном магнитном поле региона использована сводная модель EMAG2 (Maus et al., 2009; Meyer et al., 2017), объединяющая спутниковые и наземные материалы магнитных съемок. Отметим, что магнитное поле модели EMAG2 имеет значительные по площади пропуски в данных для северо-востока территории Республики Нигер, что необходимо учитывать при анализе результатов прогнозирования.

Данные об амплитудах аномалий гравитационного и магнитного полей использовались в качестве признаков, характеризующих геофизическую неоднородность изучаемой территории. Кроме того, по этим данным были рассчитаны модули горизонтальных градиентов аномального гравитационного и магнитного полей на сетке 5×5 км, которые также принимались в качестве признаков для прогнозных построений. По аномалиям гравитационного поля была рассчитана также его первая вертикальная производная на сетке 5×5 км, которая выступала в качестве еще одного признака геофизической неоднородности верхней части разреза коры.

Созданные схемы аномальных полей, а также схемы горизонтальных и вертикальных градиентов полей, позволили обратиться к структурно-тектоническим построениям по геофизическим данным. На основе анализа морфологических особенностей полей были выявлены системы примерно ортогональных структурных элементов, предположительно связанных с ориентировкой простирания и положением контактов поверхностных геологических комплексов региона (рис. 2). Аналогичные построения, выполненные

и для остальных геофизических полей, демонстрируют сходные тенденции в структурно-тектоническом районировании региона. Таким образом, выявленный мотив структурного узора территории, установленный по результатам анализа полей, может использоваться в качестве совокупности признаков неоднородности геолого-тектонического строения региона.

Важным элементом геофизических данных является также 3D плотностная модель земной коры территории Республики Нигер и прилегающих областей, полученная в результате решения трехмерной обратной задачи гравиметрии (Глазнев и др., 2021). Фрагмент этой модели, показанный на рис. 3а в виде карты распределения плотности на глубине 0 км, демонстрирует выраженные особенности плотностного строения верхней части земной коры региона. Породы щита

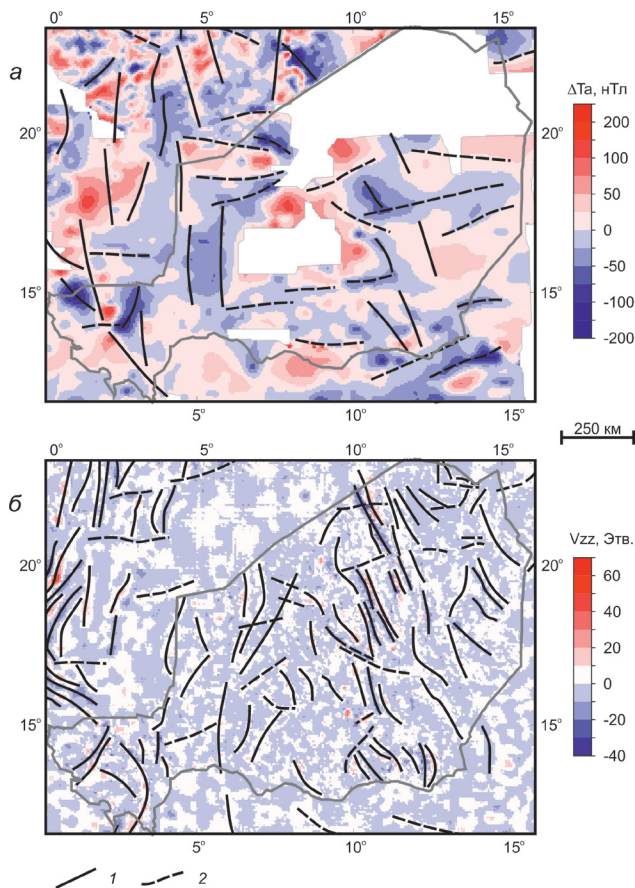


Рис. 2. Геофизические поля и элементы структурно-тектонического районирования на территории Республики Нигер и прилегающих стран: *а* — аномальное магнитное поле ΔT_a ; *б* — вертикальная производная гравитационного поля: 1 — элементы меридионального простирания; 2 — элементы широтного простирания.

Fig. 2. Geophysical fields and elements of structural-tectonic zoning of the Republic of Niger and adjacent countries: *a* — anomalous magnetic field; *б* — vertical derivative of the gravity field. Symbols: 1 — elements of meridional strike; 2 — elements of latitudinal strike.

Туарег характеризуются величинами плотности в диапазоне 2630–2880 кг/м³, что отвечает архейско-протерозойским породам (Кербали, 2000), а гранитоиды массивов Аир и Джадо представлены породами с плотностью около 2680 кг/м³. Отметим, что на уровне показанного горизонтального среза 3D плотностной модели (рис. 3а) массив Аир разделяется на северную и южную части. Породы осадочного чехла представлены кайнозойскими и мезозойскими комплексами с плотностью, соответственно, около 2050 и 2370 кг/м³ (Якуба, 2019а, 2019б). Приведенные данные о плотности верхней части разреза коры, установленные по результатам решения обратной задачи гравиметрии, могут использоваться в качестве одного из признаков неоднородности геологического строения региона.

Как отмечалось, для известных крупных месторождений урана установлена их приуроченность к определенному интервалу глубин в толще осадочного чехла. Для нашей территории исследований была составлена обобщенная модель чехла (Глазнев, Якуба, 2021), объединяющая данные о строении осадочной части модели LITHO1 (Pasyanos et al., 2014) и новые

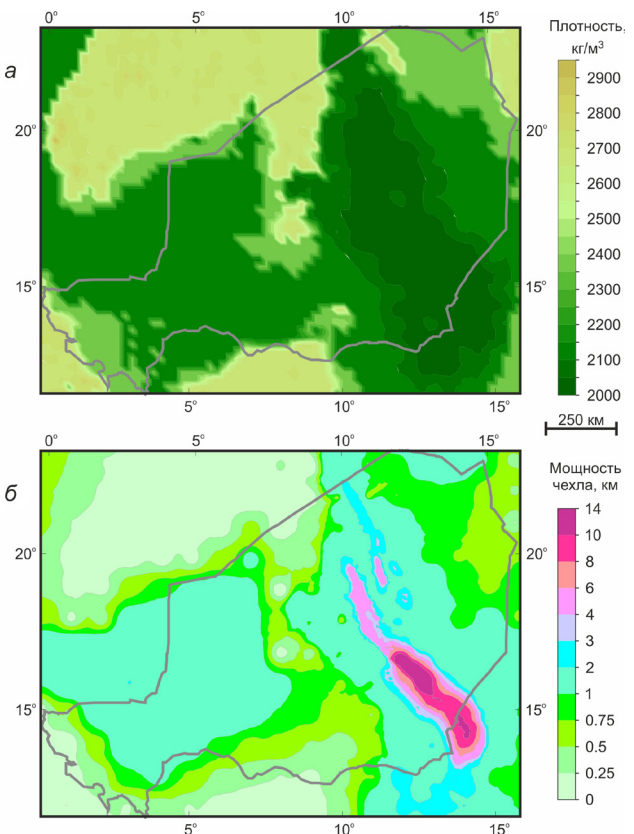


Рис. 3. Плотность пород на территории Республики Нигер и прилегающих стран на глубине 0 км (*а*) и мощность осадочного чехла (*б*).

Fig. 3. Density of rocks in the territory of the Republic of Niger and adjacent countries at a depth of 0 km (*a*) and thickness of the sedimentary cover (*б*).

результаты сейсмической интерпретации данных, полученных методом отраженных волн общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) для области рифтового бассейна восточного Нигера (Ahmed et al., 2020). В сводной модели чехла региона выявляются три главных структурных этажа, сложенных комплексами пород кайнозоя, мезозоя и палеозоя. Диапазоны мощности комплексов чехла составляют: для кайнозойских пород 0.0–4.3 км, для мезозойских пород 0.0–6.1 км и для палеозойских пород 0.0–4.9 км. Схема суммарной мощности осадочного чехла на территории исследований (рис. 3б), характеризующая диапазон возможного глубинного размещения пластово-инфильтрационных месторождений урана, может использоваться в качестве значимого прогнозного признака.

Еще одним важным прогнозным признаком являются данные о рельефе региона, представленные в цифровой модели ETOPO1 (Amante, Eakins, 2009). Выборка данных этой модели, выполненная для изучаемой территории, показала, что абсолютные отметки высот и наклоны дневной поверхности демонстрируют достаточно хорошую расчлененность рельефа и значимые связи указанных параметров с геологическим строением верхней коры. С общих тектонических позиций (Артюшков, 1993) неоднородности указанных параметров характеризуют степень неотектонических процессов и скорость процессов эрозии рельефа дневной поверхности. Кроме того, разность гипсометрических отметок обеспечивает гидравлический напор грунтовых вод, играющих, как отмечалось выше, важную роль в формировании месторождений урановых руд. Таким образом, указанные характеристики рельефа региона могут также использоваться в качестве прогнозных признаков.

БУФЕРНЫЕ ЗОНЫ ДАННЫХ

Данные по генезису урановых месторождений песчаникового типа, упомянутые выше, показывают, что эти объекты находятся, как правило, на некотором пространственном удалении от характерных геолого-геофизических неоднородностей верхней коры. Для операций с такими векторными данными средствами геоинформатики (ArcGIS, 2001) строятся т.н. «буферные зоны», которые можно рассматривать как некоторую область влияния признака в заданном пространственном диапазоне. В нашем случае к таким признакам относятся: выходы пород докембрийского гранитоидного комплекса щита Туарег (рис. 1), которые являются первичным источником урановой минерализации; структурно-тектонические элементы по геофизическим данным (рис. 2), которые ограничивают участки локализации

месторождений (Тарханов, Бугриева, 2012; Billon, Patrier, 2019; Sani et al., 2021); интерпретационные данные трехмерной плотностной модели (рис. 3а), горизонтальные градиенты которой характеризуют пространственное положение границ гранитоидных комплексов докембрия.

Собственно построение буферных зон выполнялось для различных значений ширины этих зон, что позволило проанализировать пространственное влияние использованных признаков на примере эталонных объектов и выбрать оптимальные характеристики размеров буферных областей. Пример построения буферных зон для линейных структурных элементов заданного простирания, выделенных по аномалиям наблюдаемого гравитационного поля, показан на рис. 4а. Еще один пример построения буферных зон для

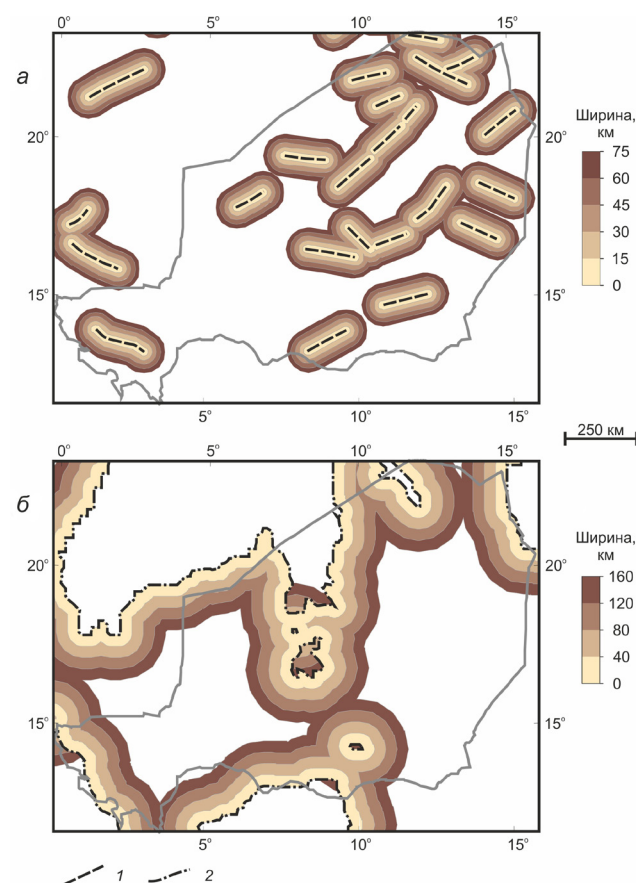


Рис. 4. Буферные зоны на территории Республики Нигер и прилегающих стран: *а* — линейных широтных структурных элементов гравитационного поля; *б* — полигональных областей горизонтального градиента плотности. 1 — структурные элементы, выделенные по гравитационному полю; 2 — изолиния плотности 2630 кг/м³.

Fig. 4. Buffer zones in the territory of the Republic of Niger and adjacent countries expressed by linear latitudinal structural elements of the gravity field (*a*) and by polygonal regions of the horizontal density gradient (*b*). 1 — structural elements from the gravity field; 2 — density isoline of 2630 kg/m³.

внешности полигональных областей горизонтального градиента плотности, на заданном глубинном срезе, приведен на рис. 4б. Отметим, что для неперекрывающихся полигональных областей могут существовать достаточно сложные сочетания буферных зон (рис. 4).

В целом, построение буферных зон линейных и полигональных объектов наиболее полно отвечают существу поставленной задачи прогнозирования, так как позволяют определить области, находящиеся на заданном удалении от рассматриваемых геофизических аномалий, а равно и соответствующих им геологических объектов.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Сформированная на основе рассмотренной геолого-геофизической информации система признаков включает в себя следующие показатели: значение аномалий гравитационного поля; величину модуля горизонтального градиента гравитационного поля; значение аномалий вертикальной производной гравитационного поля; значение аномалий регионального магнитного поля ΔT_a ; величину модуля горизонтального градиента магнитного поля ΔT_a ; значение высот рельефа; величину модуля горизонтального градиента рельефа; значение мощности осадочного чехла; значение плотности пород на уровне 0 км в плотностной модели коры; буферные зоны расстояний от комплексов докембрийских гранитоидов; буферные зоны расстояний от области градиента плотности; буферные зоны расстояний от структурных элементов меридионального и широтного простирания по данным гравитационного поля; буферные зоны расстояний от структурных элементов меридионального и широтного простирания по данным вертикальной производной гравитационного поля; буферные зоны расстояний от структурных элементов меридионального и широтного простирания по данным регионального магнитного поля ΔT_a .

Для регулярного представления всех 17 признаков по изучаемой территории была выбрана ячейка (грид) представления данных с размерами 20×20 км, что отвечает детальности исходной геофизической информации и результатам наших интерпретационных построений. Разумеется, принятый размер грида данных не позволяет говорить о точном прогнозе пространственного положения отдельных возможных месторождений урана даже крупного размера (до 5–8 км), однако главной задачей нашего исследования является региональная оценка перспектив ураноносности территории Республики Нигер.

Именно с этих позиций принятый размер грида является допустимо оптимальным по соотношению с пространственной детальностью исходных геолого-геофизических данных.

Собственно построение грид-модели данных выполнялось стандартными средствами использованной геоинформационной системы (ArcGIS, 2001), что позволило сформировать единообразное описание признаков по территории. Полученные грид-модели данных позволили проанализировать распределение выбранных признаков для 12 эталонных объектов — известных крупных месторождений урана на территории Республики Нигер (рис. 1). Распределение признаков на эталонных объектах (рис. 5) демонстрирует высокую степень их информационной значимости для классификационных построений по следующим показателям: горизонтальному градиенту гравитационного поля, региональному магнитному полю, горизонтальному градиенту магнитного поля ΔT_a , высотам рельефа, мощности осадочного чехла, расстоянию до комплексов докембрийских гранитоидов, плотности пород, расстоянию до зоны градиента плотности, расстоянию до меридиональных структурных элементов гравитационного поля, расстоянию до широтных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля. Для остальных признаков их информационная значимость менее выражена, но и они могут использоваться при прогнозировании, поскольку значения признаков по всей совокупности точек грид-модели данных имеют существенно более широкий диапазон.

Построенные распределения признаков на эталонных объектах позволили выполнить «реклассификацию» грид-моделей данных с использованием стандартных процедур геоинформационной системы (ArcGIS, 2001). Фактически процедура реклассификации грид-моделей признаков приводит их значения к единой условной шкале, отражающей информационное содержание признака (значение частоты на гистограмме) по отношению к эталону. Для значений величин признаков не характерных эталонам их информационная содержательность принималась равной нулю. Таким образом, полученные грид-модели реклассифицированных признаков представляют входную информацию в новой системе единиц (классов) относительно использованных эталонов.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Процедура прогнозного моделирования сводится к задаче классификации в весовом

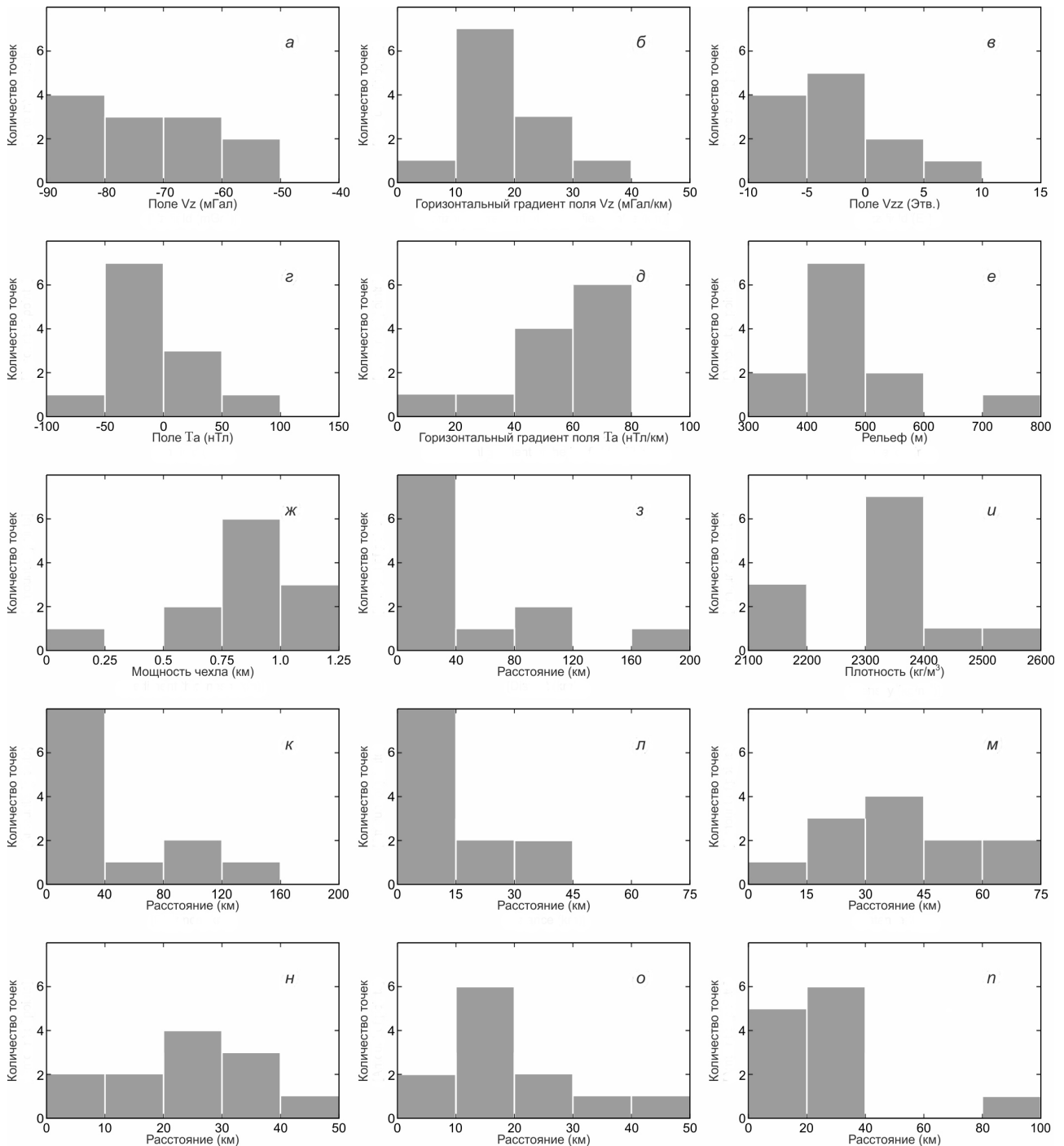


Рис. 5. Гистограммы распределений признаков для эталонов ($N=12$): *a* — гравитационное поле; *б* — горизонтальный градиент гравитационного поля; *в* — вертикальная производная гравитационного поля; *г* — региональное магнитное поле; *д* — горизонтальный градиент магнитного поля; *е* — рельеф; *ж* — мощность осадочного чехла; *з* — буферные зоны для комплексов докембрийских гранитоидов; *и* — плотность пород в плотностной модели; *к* — буферные зоны градиента плотности; буферные зоны меридиональных (*л*) и широтных (*м*) структурных элементов гравитационного поля; буферные зоны меридиональных (*н*) и широтных (*о*) структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля; (*п*) — буферные зоны широтных структурных элементов регионального магнитного поля.

Fig. 5. Histograms of feature distributions for the standards ($N=12$): *a* — gravity field; *б* — horizontal gradient of the gravity field; *в* — vertical derivative of the gravity field; *г* — regional magnetic field; *д* — horizontal gradient of the magnetic field; *е* — topography; *ж* — thickness of sedimentary cover; *з* — buffer zones for complexes of Precambrian granitoids; *и* — rock density in the density model; *к* — buffer zones of the density gradient; buffer zones of the meridional (*л*) and latitudinal (*м*) structural elements of the gravity field; buffer zones of the meridional (*н*) and latitudinal (*о*) structural elements of the vertical derivative of the gravity field; (*п*) — buffer zones of the latitudinal structural elements of the regional magnetic field.

пространстве признаков (Калинин, 2011), что можно сформулировать как вычисление функции вида

$$P(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M w_m \cdot p_m(i, j), \quad (1)$$

где N — количество использованных эталонных объектов ($N=12$); m — индекс m -го признака, M — количество признаков; $p_m(i, j)$ — значение m -го реклассифицированного признака в точке грида с координатами i и j , w_m — весовая функция для признака m , $P(i, j)$ — вычисленное значение комплексного признака для точки грида с координатами i и j . На практике вычисления по формуле (1) выполняются стандартными средствами операций над гридами, представленными в программном модуле ArcGIS Spatial Analyst (ArcGIS, 2001). Принципиально важным моментом в таком моделировании является выбор системы весовых функций w_m , которые обеспечивают оптимальность классификации территории по некоторым априорным правилам для набора признаков.

На первом этапе прогнозирования использовались единичные веса признаков, что является стандартным подходом в рамках ArcGIS Spatial Analyst. Результат такого моделирования (рис. 6) демонстрирует невысокую пространственную дифференцируемость прогнозных построений, причем положение некоторых эталонных объектов не проявляется в данных регионального прогноза. Очевидно, что такой результат является следствием допущения о равных весах признаков, хотя материалы анализа (рис. 5) и показывают существенно

различающуюся информационную содержательность использованных признаков. Этот аспект проблемы имеет определяющее значение для прогнозирования с использованием совокупности эталонов.

Для оценки информационной содержательности признаков, а равно и значения их весов в выражении (1), был использован метод группового учета аргументов (МГУА) (Муравина, 2012; Муравина, Пономаренко, 2016). По своей сути технология МГУА, являющегося методом индуктивного моделирования, позволяет выполнять системный анализ данных и формировать идентификационную модель как полиномиальную функцию зависимой переменной от наиболее влиятельных аргументов. Метод основан на генерации и переборе различных моделей, отличающихся как структурой, так и параметрами. Варианты структуры уравнений формируются на основе базовой функции, которая представляет собой полином Колмогорова-Габора второй степени для двух переменных (Муравина, 2009). Усложнение структуры моделей и увеличение количества параметров достигается за счет организации многорядного алгоритма, что фактически реализует синергетический принцип выбора наилучшей модели. Качество моделирования обеспечивается использованием обучающей и тестовой последовательности данных. Результаты применения МГУА при работе с геолого-геофизическими данными подтверждают его эффективность (Муравина, 2009; Муравина и др., 2019; Муравина, Пономаренко, 2021).

При работе с данными грид-модели реклассифицированных признаков была сформирована матрица данных, включающая значения рассмотренных 17 признаков для всех 12 известных месторождений (рис. 1), которая была дополнена таким же количеством заведомо безрудных объектов, равномерно распределенных на участках изучаемой территории, в пределах которых наличие месторождений маловероятно. Таким образом, длина анализируемой последовательности наблюдений составила 24 значения, где зависимая переменная Y принимала значение 1 (наличие месторождения) или 0 (отсутствие месторождения), а в роли переменных-аргументов выступали анализируемые признаки.

Идентификационное моделирование МГУА выполняется с помощью программы, адаптированной для работы с геолого-геофизическими данными (Муравина, Пономаренко, 2016). В результате моделирования было получено семейство модельных уравнений связей между параметрами, качество которых, согласно принятой технологии применения МГУА, оценивалось

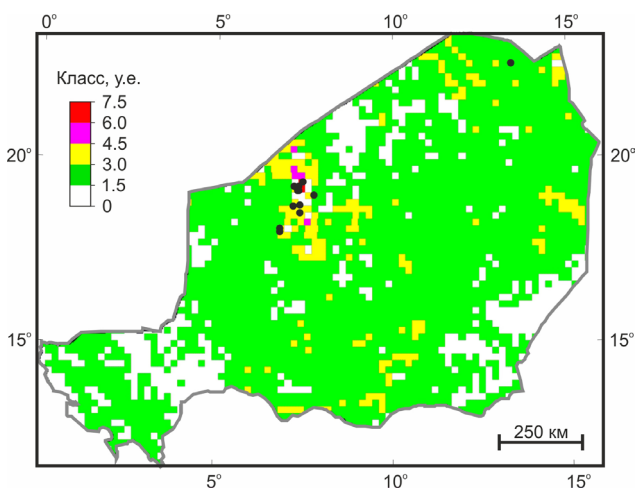


Рис. 6. Предварительный прогноз месторождений урана на территории Республики Нигер при единичных весах признаков. Точки — положение известных месторождений песчаникового типа.

Fig. 6. Preliminary forecast of uranium deposits in the territory of the Republic of Niger with single weights of signs. Points are the position of known sandstone type uranium deposits.

по значению критерия регулярности — независимого внешнего критерия, рассчитываемого по формуле:

$$\varepsilon^2 = \frac{\sum_{k=1}^K (Y_k - Ym_k)^2}{\sum_{k=1}^K Y_k^2}, \quad (2)$$

где K — размер тестовой последовательности данных, не задействованных в процедуре формирования модели; Y — фактические значения зависимой переменной; Ym — модельные значения зависимой переменной.

По результатам выполненного идентификационного анализа лучших моделей все признаки были разделены на четыре условных группы. В первую группу включены признаки, вошедшие в два лучших уравнения ($\varepsilon^2 = 0.15$), включающие буферные зоны меридиональных и широтных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля, а также буферные зоны широтных структурных элементов гравитационного поля и собственно аномальное гравитационное поле. Во вторую группу вошли признаки, формирующие модельные уравнения со значением критерия ($\varepsilon^2 = 0.17-0.20$), к которым отнесены буферные зоны градиента плотности, буферные зоны широтных структурных элементов регионального магнитного поля и меридиональных элементов гравитационного поля, буферная зона удаленности от архейско-протерозойских комплексов и значения плотности в плотностной модели коры. К третьей группе ($\varepsilon^2 = 0.25-0.29$) отнесены менее значимые признаки: модуль горизонтального градиента гравитационного поля, аномалии вертикальной производной гравитационного поля, величина модуля горизонтального градиента магнитного поля, отметки рельефа, мощность осадочного чехла. В четвертую группу объединены признаки с наименьшей информационной значимостью ($\varepsilon^2 > 0.33$): региональное магнитное поле, буферные зоны меридиональных структурных элементов магнитного поля и наклон рельефа дневной поверхности.

Качество сформированных модельных зависимостей (уравнений) продемонстрировано на рис. 7 для выборок из первой и третьей группы данных. Следует отметить, что в приведенных идентификационных зависимостях, построенных на реальных природных данных, всегда имеют место ошибки, как первого, так и второго рода (Никитин, 1988). И если для лучшей модели таких ошибок только две — одна первого (точка 4) и одна второго (точка 24) рода, то для «худшей» модели таких ошибок уже пять — три первого и две второго рода, причем, что важно, они относятся к иным точкам данных. Подобного рода расхождения, характеризуют качество идентификации для

выбранных признаков, но несколько не препятствуют использованию в прогнозировании каждого из них, естественно, со своими весами.

Основным результатом построения модельных зависимостей МГУА, в нашем случае явились разделение совокупности признаков на четыре группы с различным качеством идентификации данных и определение относительных весов влияния признаков по значению критерия регулярности (2). Рассчитанные веса для первых трех групп признаков были незначительно откорректированы с учетом величин наиболее значимых коэффициентов в модельных идентификационных уравнениях для каждого признака. Сводные значения весов признаков показаны в таблице.

Как явствует из приведенной таблицы, признаки отличаются по своему вкладу в общее значение комплексного параметра. Максимальным весом обладают признаки, полученные по геофизическим полям и геологическим данным (признаки 1-10), и еще четыре признака имеют существенно меньший вес. В целом полученные веса признаков в опосредованной форме отражают описанную выше систему априорных геолого-геофизических сведений о поисковых критериях наличия урановых месторождений песчаникового типа.

Итоговый прогнозный расчет возможного наличия месторождений урана был выполнен для всей изучаемой территории, согласно выражению (1) со значениями весов признаков, установленных по данным идентификационного

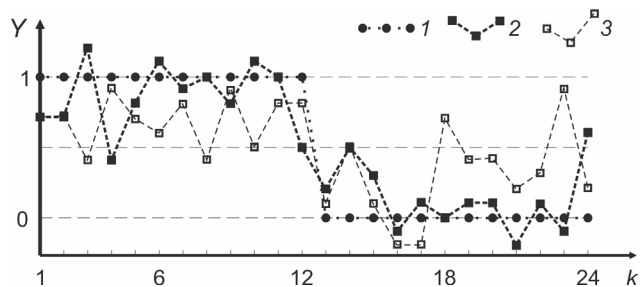


Рис. 7. Результаты идентификационного анализа МГУА. По вертикальной оси значение зависимой переменной Y , по горизонтальной оси номера точек в выборке данных: 1 — эталонная выборка (с 1 по 12 наличие месторождений, с 13 по 24 их отсутствие); 2 — лучшая модель для первой группы ($\varepsilon^2 = 0.15$); 3 — «худшая» модель для третьей группы ($\varepsilon^2 = 0.29$).

Fig. 7. Results of GMDH identification analysis. On the vertical axis is the value of the dependent variable Y , on the horizontal axis are the numbers of points in the data sample. 1 — reference sample (from 1 to 12 the presence of deposits, from 13 to 24 their absence); 2 — the best model for the first group ($\varepsilon^2 = 0.15$); 3 — «worst» model for the third group ($\varepsilon^2 = 0.29$).

Таблица весов признаков

Table of attribute weight

№	Признак	Вес
1	Буферные зоны широтных структурных элементов гравитационного поля	1.0
2	Буферные зоны меридиональных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля	1.0
3	Значения плотности в плотностной модели	0.9
4	Буферные зоны удалённости от архейско-протерозойских комплексов фундамента	0.9
5	Значения аномалий гравитационного поля	0.8
6	Величина мощности осадочного чехла	0.8
7	Буферные зоны меридиональных структурных элементов гравитационного поля	0.8
8	Буферные зоны градиента плотности	0.7
9	Буферные зоны широтных структурных элементов магнитного поля	0.7
10	Буферные зоны широтных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля	0.6
11	Величина модуля горизонтального градиента гравитационного поля	0.4
12	Величина модуля горизонтального градиента магнитного поля	0.3
13	Отметки рельефа	0.2
14	Значение вертикальной производной гравитационного поля	0.1

анализа МГУА. Результаты прогнозирования (рис. 8) демонстрируют высокую степень пространственной дифференцируемости прогнозных построений и достаточно четкое соответствие максимумов комплексного параметра прогноза (класса) положению основной части эталонных объектов.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Основным методическим аспектом нашего исследования является объединение формальной эвристической технологии распознавания образов (Калинин, 2011; ArcGIS, 2002; Carranza, 2002) и синергетических принципов оценки информационной содержательности совокупности использованных признаков на основе технологии МГУА (Муравина, 2009, 2012; Муравина и др., 2019а; Муравина, Пономоренко, 2016; Muravina et al., 2019а). Реализованный подход позволяет получить наиболее полную ранжированную характеристику изучаемого объекта и, частично, сократить общее количество признаков, сохранив при этом максимальное количество полезной информации. Именно такие

аспекты прогнозирования, обозначенные как наиболее актуальные в задачах геологического картирования и минерагенического прогнозирования (Бабаянц, Трусов, 2022), выходят в настоящее время на первый план комплексных методов анализа геолого-геофизических данных.

Эффективность использования реализованной технологии была продемонстрирована на примере регионального прогноза месторождений урана песчаникового типа по территории Республики Нигер. Сформированная оптимальная совокупность признаков позволила построить пространственное распределение комплексного параметра на изучаемой территории (рис. 8) и выделить ряд перспективных областей, которые характеризуются высокими значениями параметра (>3.2 условных единиц).

Первая такая область (рис. 8) располагается в северо-западном обрамлении массива Аир и сопряжена с субмеридиональной зоной трансрастяжения, сформированной региональным разломом Азауа-Арлит (Konate et al., 2007). Данная область максимума комплексного параметра достаточно хорошо соответствует как геофизическим аномалиям (рис. 2–4), так и к геолого-тектоническим особенностям изучаемой территории (рис. 1). Прогнозная область 1 находится на удалении в несколько десятков км к северу от группы известных крупных месторождений Акаута-1, Акаута-2, Арлит и по всем

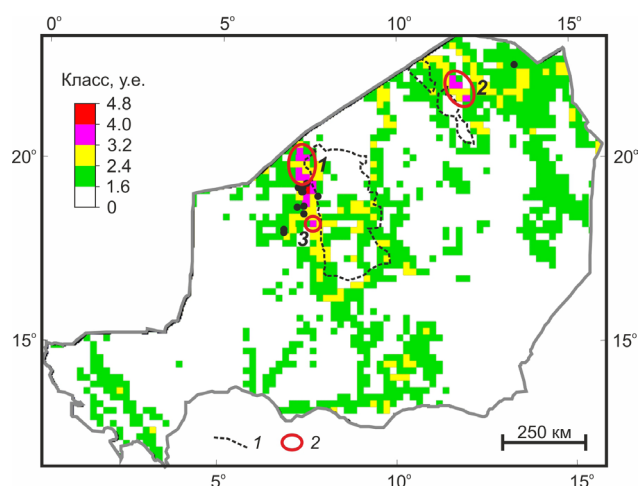


Рис. 8. Итоговый прогноз месторождений урана на территории Республики Нигер: 1 — границы массивов Аир и Джато; 2 — участки перспективные на обнаружение месторождений. Точки — положение известных месторождений песчаникового типа.

Fig. 8. The final forecast of uranium deposits in the territory of the Republic of Niger: 1 — boundaries of the Air and Djado massifs; 2 — areas promising for the discovery of deposits (their numbers are shown in italics). Points are position of the known sandstone type uranium deposits.

признакам может рассматриваться как наиболее перспективная для детальных поисков новых месторождения урана песчаникового типа.

Вторая интересная аномальная область комплексного параметра расположена к востоку от массива Джадо (рис. 8). В геологическом отношении область 2 соответствует пологому северо-западному борту бассейна Джадо (Глазнев, Якуба, 2021) и пространственно совпадает с корневой частью собственно массива Джадо, установленной по результатам плотностного моделирования земной коры (Глазнев и др., 2021). С тектонических позиций область 2 приурочена к системе структурных элементов меридионального простирания, выявленной по данным анализа аномалий вертикальной производной гравитационного поля (рис. 2). В целом прогнозная область 2, хотя и находится на удалении около 200 км от известного месторождения Джадо (рис. 8), по совокупности геолого-геофизических признаков может рассматриваться как достаточно перспективная для постановки детальных поисковых работ на обнаружение урановой минерализации песчаникового типа.

Третья аномальная область комплексного параметра (рис. 8) имеет существенно меньшие размеры в плане. Указанная область приурочена к региональному разлому Азауа-Арлит (Konate et al., 2007) и расположена в нескольких десятках километров к югу от месторождения Секирет (рис. 1). По совокупности геолого-геофизических признаков область 3 также может быть рекомендована для проведения детальных поисковых работ на обнаружение урановой минерализации песчаникового типа.

Особо отметим, что при детализации комплексных исследований на перспективных прогнозных участках работ следует совместно рассматривать региональные геофизические построения для земной коры в целом и более детальные геолого-геофизические результаты построений по ее верхней части. Примеры таких комплексных регионально-локальных минерагенических исследований показали их высокую результативность для конкретных объектов на территории Балтийского щита (Белашев и др., 2015; Glaznev et al. 2015; Mitrofanov et al., 1998) и Воронежского кристаллического массива (Минц и др., 2017; Муравина и др., 2019б).

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика комплексного анализа региональных геолого-геофизических данных демонстрирует хорошую эффективность и дифференцированность минерагенического прогноза на обнаружение месторождений урана для территории Республики Нигер.

2. Выявленные области максимумов комплексного прогнозного параметра рекомендованы для постановки новых поисковых геофизических работ с целью обнаружения месторождений урана песчаникового типа.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению содержания статьи.

Научные исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 20-05-00190.

Список литературы [References]

- Артюшков Е.В. Физическая тектоника / М.: Наука. 1993. 456 с. [Artyushkov E.V. Physical tectonics / M.: Nauka. 1993. 456 p. (in Russian)].
- Бабаянц П.С., Трусев А.А. Методы распознавания образов при геологическом картировании и прогнозе оруденения / Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 48-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. СПб.: ВСЕГЕИ. 2022. С. 19–21. [Babayants P.S., Trusov A.A. Metody raspoznavaniya obrazov pri geologicheskoy kartirovaniy i prognoze orudeneniya / Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh polej. Materialy 48-j sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar im. D.G. Uspenskiy – V.N. Strakhov. SPb.: VSEGEI. 2022. P. 19–21. (in Russian)].
- Белашев Б.З., Бойчук М.А., Горьковец В.Я. и др. Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерагения). Издательство: Карельский научный центр РАН. Петрозаводск, 2015. 322 с. [Belashev B.Z., Boichuk M.A., Gorkovets V.Ya. et al. Kostomuksha ore district (geology, deep structure and mineragenia). Publisher: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Petrozavodsk, 2015. 322 p. (in Russian)].
- Бойцов В.Е. Геология месторождений урана. М.: Недра, 1989. 302 с. [Boytsov V.E. Geology of uranium deposits / M.: Nedra, 1989. 302 p. (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Якуба И.А. Мощность земной коры территории Республики Нигер по данным стохастической интерпретации гравитационного поля // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2020. № 4. С. 46–58. <https://doi.org/10.17308/geology.2020.4/3126> [Glaznev V.N., Yacouba I.A. Determining the thickness of the Earth's crust in the territory of the Republic of the Niger based on the stochastic interpretation of the gravitational field // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2020. № 4. P. 46–58 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Якуба И.А. Гравитационный эффект осадочного чехла территории Республики Нигер // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 2. С. 71–82. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.2/3490> [Glaznev V.N., Yacouba I.A. The gravitational effect of the sedimentary cover located in the Republic of Niger // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2021. № 2. P. 71–82 (in Russian)].

- Глазнев В.Н., Минц М.В., Якуба И.А. Трехмерная плотностная модель земной коры территории Республики Нигер // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2021. № 4 (52). С. 6–21. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-6-21> [Glaznev V.N., Mints M.V., Yakuba I.A. Three-dimensional density model of the earth's crust of the territory of the Republic of Niger // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2021. № 4(52). P. 6–21 (in Russian)].
- Калинин Д.Ф. Информационно-статистический прогноз полезных ископаемых / СПб.: ФГУНПП «Геологоразведка». 2011. 164 с. [Kalinin D.F. Information and statistical forecast of minerals / SPb.: FSUNPP «Geologorazvedka». 2011. 164 p. (in Russian)].
- Кербали М. Методология комплексных космо-, аэро- и наземных геофизических работ с целью крупномасштабного геокартирования и поисков месторождений урана в условиях района Хоггар (Алжир) / Дисс. канд. техн. наук. М., 2000. 190 с. [Kerbaly M. Methodology of complex cosmo-, aero- and ground geophysical surveys with the aim of large-scale geomapping and prospecting of uranium deposits in the Hoggar region (Algeria) / Diss. Cand. of Techn. Sci. M. 2000. 190 p. (in Russian)].
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование / М.: ЗАО Геоинформмарк, 2000. 608 с. [Kislyakov Ya.M., Shchetochkin V.N. Hydrogenic ores generation / M.: ZAO Geoinformmark, 2000. 608 p. (in Russian)].
- Минц М.В., Глазнев В.Н., Муравина О.М. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2017. № 4. С. 2–23. [Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M. Deep structure of the crust in the southeast of the Voronezh crystalline massif according to geophysical data: geodynamic evolution in the Paleoproterozoic and the current state of the crust // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2017. № 4. P. 2–23 (in Russian)].
- Муравина О.М. Возможности метода группового учета аргументов при статистической обработке петрофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2009. № 2. С. 150–154 [Muravina O.M. Possibilities of the method of group accounting of arguments in the statistical processing of petrophysical data // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2009. № 2. P. 150–154 (in Russian)].
- Муравина О.М. Метод группового учета аргументов при анализе геофизических данных // Геофизика. 2012. № 6. С. 16–20. [Muravina O.M. Method of group accounting of arguments in the analysis of geophysical data // Geofizika. 2012. № 6. P. 16–20 (in Russian)].
- Муравина О.М. Идентификационный анализ петрофизических характеристик пород осадочного чехла Воронежской антеклизы // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2013. № 2 (22). С. 20–25 [Muravina O.M. Identification analysis of petrophysical characteristics of sedimentary cover rocks of voronezh antecline // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2013. № 2 (22). P. 20–25 (in Russian)].
- Муравина О.М., Долгаль А.С., Аузин А.А. и др. Сферы применения современных статистических методов обработки геофизической информации // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019а. № 4. С. 79–84. <https://doi.org/10.17308/geology.2019.4/2699> [Muravina O.M., Dolgal A.S., Auzin A.A. et al. Spheres of application of modern statistical methods of processing of geophysical information // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2019a. № 4. P. 79–84. (in Russian)].
- Муравина О.М., Пономоренко И.А. Программная реализация метода группового учета аргументов при идентификационном моделировании геолого-геофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. № 2. С. 107–110 [Muravina O.M., Ponomorenko I.A. Software implementation of the method of group accounting of arguments in the identification modeling of geological and geophysical data // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. 2016. № 2. P. 107–110 (in Russian)].
- Муравина О.М., Пономаренко И.А., Минц М.В. Применение метода группового учета аргументов для анализа петрофизических данных // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2021. № 3 (51). С. 5–15. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-5-15> [Muravina O.M., Ponomarenko I.A., Mints M.V. Application of the method of group accounting of arguments for the analysis of petrophysical data // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2021. № 3 (51). P. 5–15. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-5-15> (in Russian)].
- Муравина О.М., Чернышова М.Н., Жаворонкин В.И. Идентификационный анализ ультрамафит-мафитовых интрузий мамонского комплекса Воронежского кристаллического массива // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2019б. № 3 (43). С. 88–98. [Muravina O.M., Chernyshova M.N., Zhavoronkin V.I. Identification analysis of ultramafic-mafic intrusions in the mamonsky complex of the Voronezh crystalline massif // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019b. № 3 (43). P. 88–98 (in Russian)].
- Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1988. 337 с. [Nikitin A.A. Theoretical basements of processing geophysical information. M.: Nedra. 1988. 337 p. (in Russian)].
- Сорохтин Н.О., Козлов Н.Е., Глазнев В.Н. и др. Геология и потенциальная нефтегазоносность полуострова Рыбачий (Кольский полуостров) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. № 5. С. 14–19 [Sorokhtin N.O., Kozlov N.E., Glaznev V.N. et al. Geology and potential oil-and-gas content of the Rybachi peninsula (Kola peninsula) // Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdenij. 2011. № 5. P. 14–19 (in Russian)].
- Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Крупнейшие урановые месторождения мира. Минеральное сырье. № 27. М.: ВИМС, 2012. 118 с. [Tarkhanov A.V., Bugrieva E.P. The largest uranium deposits of the world. Mineral resources. № 27. M.: VIMS. 2012. 118 p. (in Russian)].

- Якуба И.А.* Петрофизические свойства ураноносных пород Республики Нигер (обзор данных). Геофизические исследования: методика работ, интерпретация данных: Материалы ежегодной молодежной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. А.А. Аузина. Воронеж: «Научная книга», 2019а. С. 90–97 [*Yacouba I.A.* Petrophysical properties of uranium-bearing rocks of the Republic of Niger (data review). Geophysical research: methods of work, data interpretation: Materials of the annual youth scientific conference of the Department of Geophysics of Voronezh State University. Ed. A.A. Auzin. Voronezh: Nauchnaya kniga, 2019a. P. 90–97. (in Russian)].
- Якуба И.А.* Геологическая и петрофизическая характеристика урановых месторождений песчаникового типа Республики Нигер. Студенческая наука как ресурс инновационного потенциала развития. VIII междунар. студенческая науч. конф. Материалы и доклады Часть II. Отв. ред. Л.П. Земскова. Воронеж: Воронежский гос. ун-т. 2019б. с. 3–11. [*Yacouba I.A.* Geological and petrophysical characteristics of uranium deposits of sandstone type of the Republic of Niger / Student science as a resource of innovative development potential. VIII International student scientific. Conf. Materials and reports Part II. Ed. L.P. Zemskova. Voronezh: Voronezh state univ. 2019b. P. 3–11].
- Ahmed K.S., Liu K., Paterne M.A. et al.* Anatomy of Eastern Niger Rift Basin with Specific References of Its Petroleum Systems // *International Journal of Geosciences*. 2020. V. 11. № 5. P. 305–324. <https://doi.org/10.4236/ijg.2020.115016>
- Amante C., Eakins B.W.* ETOPO1 – 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data sources and Analysis // NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. 2009. <https://doi.org/10.7289/V5C8276M>
- ArcGIS 9. Spatial Analyst user guide / ESRI. Redlands. USA. 2002. 216 p.
- Billon S., Patrier P.* Diagenetic and hydrothermal history of the host rock of the Imouraren uranium deposit (Tchirezrine 2 Formation - Tim Mersoï Basin, Niger) // *Journal of African Earth Sciences*. 2019. V. 160. 103637. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103637>
- Bohari A.D., Harouna M., Mossad A.* Geochemistry of Sandstone Type Uranium Deposit in Tarat Formation from Tim-Mersoï Basin in Northern Niger (West Africa): Implication on Provenance, Paleo-Redox and Tectonic Setting // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2018. V. 6. № 8. P. 185–225. <https://doi.org/10.4236/gep.2018.68014>
- Bowden P., Bennett J.N., Kinnaird J.A. et al.* Uranium in the Niger-Nigeria younger Granite Province // *Mineralogical Magazine*. 1981. V. 44 (4). P. 379–389. <https://doi.org/10.1180/minmag.1981.044.336.03>
- Bowell R.J.* An updated integrated development plan for the Madaouela project, Niger / SRK - Consulting Limited. UK, 2015. 628 p.
- Carranza E.J.M.* Geologically-Constrained Mineral Potential Mapping. Examples from the Philippines. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. ITC Publication № 86. The Netherlands, 2002. 497 p.
- Cazoulat M.* Geology environment of the Uranium deposits in the Carboniferous and Jurassic sandstones of the Western margin of the Air mountains in the Republic of Niger. Geological environments of sandstone-type uranium deposits. International Atomic Energy Agency. Austria. Vienna. 1985. P. 247–263.
- Croisy P.* The Akouta underground uranium mine, Niger // *Shigen-Chishitsu*. 2013. V.63 (2). P. 81–90. <https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu.63.81>
- Dahlkamp F.J.* Uranium Ore Deposits. Berlin. Springer-Verlag, 1993. 460 p.
- Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M. et al.* Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust-mantle boundary // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. V. 6. № 2. P. 133–170. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176>
- Jaireth S., McKay A., Lambert I.* The Geology of Uranium deposits in Kazakhstan points to similar deposits in Australia // *AUSGEO News*. 2008. V. 89. P. 8–13.
- Kinnaird J.A., Nex P.A.M.* Uranium in Africa // *Episodes*. 2016. V. 39. № 2. P. 335–359. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2016/v39i2/95782>
- Konate M., Denis M., Yahaya M. et al.* Structuration extensive et transgressive au Devon-Dinantien du bassin de Tim Mersoï (bordure occidentale de l’Air, Nord Niger) // *Annales de l’Université de Ouagadougou. Série C*. 2007. V. 5. P. 1–32.
- Liegeois J.P., Benhallou A., Azzouni-Sekkal A. et al.* The Hoggar swell and volcanism: Reactivation of the Precambrian Tuareg shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism. Plates, plumes, and paradigms. Eds: Foulger G.R., Natland J.H., Anderson D.L. Geological Society of America, Special Paper, 2005. P. 379–400. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.379>
- Mamadou M.M., Cathelineau M., Deloule E. et al.* Cenozoic oxidation episodes in West Africa at the origin of the in situ supergene mineral redistribution of the primary uranium orebodies (Imouraren deposit, Tim Mersoï Basin, Northern Niger) // *Mineralium Deposita*. 2020. 55 (3). P. 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00945-w>
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al.* EMAG2: A 2 arc-min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2009. 10. Q08005. <https://doi.org/10.1029/2009GC002471>
- Meyer B., Saltus R., Chulliat A.* EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3 / NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>
- Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M. et al.* 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // *Geoscience Frontiers*. 2020. V. 11. № 3. P. 999–1023. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003>
- Mitrofanov F.P., Sharov N.V., Zagorodny V.G. et al.* Crustal structure of the Baltic shield along the Pechenga–Kostomuksha-Lovisa geotraverse // *International Geology Review*, 1998. V. 40 № 11. P. 990–997. <https://doi.org/10.1080/0020681980946>

- Muravina O.M., Davudova E.I., Ponomarenko I.A.* Possibility of identification of modeling in complex analysis geological and geophysical data / Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019a. P. 157–162.
- Muravina O.M., Glaznev V.N., Zhavoronkin V.I. et al.* Reflection of the Petrophysical Basement Rocks Models in Geophysical Fields / Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019b. P. 49–54.
- OECD & NEA. Uranium 1999 / Report by OECD Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency. France. Paris. 2000. 338 p. <https://doi.org/10.1787/9789264189898-en>
- Pagel M.* Uranium deposits in the Arlit area (Niger) / Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. New-York. Springer, 2005. P. 303–305. https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_79
- Pasyanos M.E., Masters G., Laske G. et al.* LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth // Journal Geophysical Research. Solid Earth. 2014. V. 119. P. 2153–2173. <https://doi.org/10.1002/2013JB010626>
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. et al.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // Journal Geophysical Research, Solid Earth. 2012. V. 117. B04406. <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
- Rechenmann J., Louis P.* Mesure gravimetriques dans le Niger orienta. Années 1963 – 1964 – 1965. Rapport Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1966. 83 p.
- Rigault C.* Cristallochimie du fer dans les chlorites de basse temperature : implications pour la geothermometrie et la determination des paleoconditions redox dans les gisements d'uranium. These Pour l'obtention du Grade de Docteur de l'Université de Poitiers. Poitie, 2010. 260 p.
- Sani A., Konate M., Wollenberg P. et al.* Tectono-sedimentary evolution of the uranium deposits of the DASA graben, northern Niger // Global Journal of Science Frontier Research. 2021. 21 (1). P. 36–64. <https://doi.org/10.34257/GJSFRHVOL21I1PG37>
- Schluter T.* Geological Atlas of Africa. Berlin: Springer, 2008. 318 p.
- Thieblemont D.* Geological Map of Africa at 1:10M scale / Cape Town: CGMW-BRGM, 2016. <https://doi.org/10.14682/2016GEOAFR>
- Yacouba I.A., Glaznev V.N.* The thickness of the Earth's crust in the territory of Republic of the Niger according to the stochastic interpretation of the gravity field / Kukkonen I.T. et al., (Eds.). Lithosphere 2021 – Eleventh Symposium on the Structure, Composition and Evolution of the Lithosphere in Finland. Helsinki: Institute of Seismology, University of Helsinki, 2021. Report S-71. P. 157–160.

REGIONAL FORECASTING OF URANIUM DEPOSITS IN THE REPUBLIC OF NIGER

V.N. Glaznev^{1,2}, O.M. Muravina¹, I.A. Yakuba¹

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394018

²Geological Institute of Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia, 184209;
e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

Received January 22, 2022; revised March 05, 2022; accepted March 27, 2022

The paper deals with the methodology and results of forecasting sandstone-type uranium deposits on the territory of the Republic of Niger, based on the use of a set of regional geological and geophysical materials and a new technology for spatial analysis of data by the method of group accounting of arguments. The necessary information on the genesis and localization of sandstone-type uranium deposits in the study area is briefly outlined. Examples of identification of formal geological, tectonic and geophysical features that characterize the location of known large objects of uranium mineralization are given. On the example of reference ore and ore-less objects, an identification analysis of the features is carried out, focused on determining their aggregate information content. The results of the identification analysis made it possible to assess the weights of the features used and perform a comprehensive regional forecasting of sandstone-type uranium deposits in the territory of the Republic of Niger. Based on the results of the forecast, the three of the most promising sites were identified, where detailed work on the detection of industrial uranium mineralization is recommended.

Keywords: uranium deposits, spatial data analysis, complex forecasting.