

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

БАДАВИ ВАЕЛЬ МАХМУД

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ТЕРРИТОРИИ ДОЛИНЫ НИЛА И МОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ
АКВАТОРИЙ (ЕГИПЕТ)**

Специальность: 1.5.15 — Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора биологических наук

Москва, 2023

Работа выполнена на кафедре радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный
консультант:

Мамихин Сергей Витальевич, доктор биологических наук

Официальные
оппоненты:

Ладонин Дмитрий Вадимович, доктор биологических наук, доцент, профессор кафедры химии почв факультета почвоведения, МГУ имени М.В.Ломоносова.

Линник Виталий Григорьевич, доктор географических наук, доцент/с.н.с., главный научный сотрудник, лаборатория эволюционной биогеохимии и экологии. ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, отдел биогеохимии и экологии, лаборатория эволюционной биогеохимии и экологии.

Лаврентьева Галина Владимировна, доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Биотехнические системы и технологии», доцент. Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится 26 декабря 2023 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.12, МГУ, Факультет почвоведения, аудитория М-2.

Тел: 8(495) 939-24-67, электронная почта: paramonovata@my.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27), и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/015.3/2619>

Автореферат разослан 19.10.2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.015.3,
кандидат биологических наук

Парамонова Т.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Одной из глобальных экологических проблем, вызванных деятельностью человека, является загрязнение биосферы тяжёлыми металлами (ТМ). Сочетание этого явления с воздействием естественных радионуклидов (ЕРН) может иметь чрезвычайно негативные последствия для нашей планеты. Тяжёлые металлы и радионуклиды обладают различной токсичностью по отношению к биоте, не подвергаются физико-химической или биологической деградации, накапливаются в поверхностных слоях почвы, становясь доступными для корневого поглощения растениями, а затем по пищевой цепи поступают к человеку (Kabata-Pendias, 2011; Тихомиров, Алексахин, 1987). Зная концентрации элементов и активность радионуклидов, мы можем оценить степень их воздействия на человека и рассчитать возможные риски, в том числе оценить суммарный риск от воздействия радионуклидов и экотоксикантов, используя принципы эквидозиметрии. Понятие «эквидозиметрия» в научной литературе трактуется неоднозначно (Кеирим-Маркус, 1980; Кудряшов, 2004). Эквидозиметрия как научное направление в экологии в её современном понимании находится в начальной стадии своего развития. Её появление и дальнейшее совершенствование были неизбежны и обусловлены широким применением ядерной и термоядерной энергии, наличием других источников ионизирующего излучения и химическим загрязнением окружающей среды человеком. В практическом аспекте эквидозиметрия в её расширенной трактовке – это расчёт совокупного риска от радиационного, химического и биологического воздействия на человека (Bréchignac, Desmet, 2005; Maubert, 2005; Tsytugina, 2005).

Территории долины реки Нил и морских прибрежных акваторий Арабской Республики Египет (Красное и Средиземное моря) являются наиболее густонаселёнными регионами страны. Это усиливает актуальность работы в связи с необходимостью получения современных данных, являющихся основой для расчёта индексов загрязняющих веществ и дальнейшей оценки возникающих экологических рисков в Египте. Поскольку геоэкологические и биогеохимические особенности территории играют существенную роль в формировании дозовых нагрузок на человека и окружающую среду (Tzortzis et al., 2003), в рамках работы была проведена оценка экологической ситуации на основе информации, полученной в ходе исследований двух контрастных в этом отношении типов территорий, а именно долины реки Нил и морских прибрежных акваторий Египта.

Целью диссертационной работы является оценка радиоэкологической и экотоксикологической ситуации на густонаселённых территориях долины реки Нил и морских прибрежных акваторий Египта.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Создать базы данных по современным уровням содержания и элементному составу хемотоксикантов и естественных радионуклидов (ЕРН) на исследуемых территориях.
2. С помощью GIS-технологий построить карты пространственного распределения элементов-хемотоксикантов и ЕРН в почвах и отложениях и определить источники загрязнения исследуемых территорий.
3. Оценить показатели радиоэкологического и экотоксикологического состояния окружающей среды при современных уровнях содержания

естественных радионуклидов и хемотоксикантов в почве и отложениях исследуемых территорий Египта.

4. Оценить риски, обусловленные элементами-хемотоксикантами, а также дозовые нагрузки от ЕРН и связанные с ними риски воздействия на человека на исследуемых территориях.
5. Рассчитать эквидозиметрические параметры и оценить совокупные риски влияния элементов-хемотоксикантов и ЕРН на территории долины реки Нил и морских прибрежных акваторий Египта.
6. Дать прогноз динамики экологического состояния на территории долины Нила и морских прибрежных акваторий Египта.

Научная новизна: получил развитие эквидозиметрический подход к оценке экологического состояния территорий. Для долины реки Нил и морских прибрежных акваторий Египта получена принципиально новая информация по элементному составу, содержанию экотоксикантов и ЕРН в почве и отложениях. Впервые для этих регионов Египта определены уровни референтных фоновых значений содержания химических элементов в почвах и отложениях, создана актуальная база данных современного содержания химических элементов и радионуклидов, построена карта пространственного распределения индексов индивидуального и комплексного загрязнения территории экотоксикантами и ЕРН, дана оценка современного радиоэкологического и экотоксикологического состояния и разработан прогноз на будущее.

Теоретическая и практическая значимость: результаты исследований, полученные в работе, могут быть использованы в качестве фоновых данных для мониторинга загрязнения окружающей среды и являются основой для расчёта индексов загрязняющих веществ и дальнейшей оценки возникающих экологических рисков в Арабской Республике Египет (АРЕ). На основе

полученных результатов составлены карты пространственного распределения элементов-экотоксикантов и выделены районы с повышенными уровнями их содержания в стране. Определены источники загрязнения, оценена современная экологическая обстановка и дан прогноз ее изменения на исследуемых территориях.

Результаты данной работы в виде научных статей и двух баз данных были представлены в Академии научных исследований и технологий Египта лицам, принимающим решения в области экологии, для дальнейшего распространения среди заинтересованных сторон и использования этой информации в соответствии с научными и практическими интересами и административными обязанностями. Работа представляет интерес и полезна для исследователей в различных дисциплинах, таких как физика, химия, статистика, политология, инженерное дело, агрономия, для уполномоченных органов, в области рыболовства и океанографии, а также для специалистов Министерства окружающей среды.

Данная работа является первым широкомасштабным исследованием по изучению загрязнения химическими элементами и содержания ЕРН в почве и донных отложениях и их влиянию на экологическое состояние густонаселённых регионов АРЕ. Результаты данной работы позволят вскрыть особенности загрязнения почв и отложений с точки зрения геохимии и наметить районы с геогенно- и техногенно-повышенными концентрациями элементов на исследуемых территориях. Это позволяет оценить современную экологическую обстановку и дать прогноз ее изменения на исследуемых территориях. На основе полученных результатов рассчитаны индивидуальные и комплексные показатели для оценки экологической ситуации и качества почвы и донных отложений. Знания о закономерностях

формирования дозовых нагрузок и оценка экологического риска от совокупного воздействия химических элементов и ЕРН дополняет и расширяет концепцию «эквидозиметрия».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Современная эколого-геохимическая характеристика территорий вдоль реки Нил и прибрежных районов египетской акватории Средиземного и Красного морей. Элементный состав и соотношение ТМ и ЕР в почвах и донных отложениях в наиболее густонаселённых районах Арабской Республики Египет (АРЕ).
2. Карта пространственного распределения дозовых нагрузок от ЕРН и элементов-хемотоксикантов и загрязнения. GIS технологии идентификации источников и природы загрязнения территории ЕРН и элементами-хемотоксикантами.
3. Конкретизация эквидозиметрического подхода и его адаптация к оценке сочетанного загрязнения территорий ТМ и ЕРН. Апробация разработанного метода на примере оценки экологических рисков для густонаселённых районов долины реки Нил и прибрежных акваторий Средиземного и Красного морей АРЕ.
4. Индивидуальные и комплексные индексы загрязнений – индикаторы оценки экологической ситуации на исследуемых территориях Египта.
5. Современные уровни потенциальных радиоэкологических, экотоксикологических и эквидозиметрических рисков, обусловленных текущим содержанием естественных радионуклидов и хемотоксикантов в почвах и донных отложениях исследуемых территорий Египта.

6. Актуальная база данных по содержанию и элементному составу хемотоксикантов и ЕРН в почвах и донных отложениях долины реки Нил и прибрежных акваториях Средиземного и Красного морей АРЕ.

Личный вклад автора: в основе работы лежат данные полевых исследований автора, проводимых в 2011–2022 гг. Автором самостоятельно были сформулированы тема, цели и задачи, спланированы и выполнены научные эксперименты, получены и проанализированы исходные данные, сформулированы заключения, основополагающие выводы работы и обобщение результатов. В совместных статьях вклад автора составлял более 80%, включая 90% написание статей, статистический анализ полученных данных, инфографика и картография. Часть экспериментальной работы выполнена в рамках подготовки кандидатских диссертаций Ахмеда Талаата, Мухамеда Митвалли и Нагвы Саад, научным руководителем которых являлся автор, и магистерских диссертаций Ясмин Сархан и Атии Махмуда, также выполненных под руководством автора.

Апробация материалов диссертации: Результаты работы были доложены на международных конференциях: «11th conference on radiation physics and protection», (Египет, 2012); «International experts' meeting on radiation protection after Fukushima Diichi accident: promoting confidence and understanding», (Австрия 2014); «Workshop about “five years cooperation with Dubna”», (Египет, 2015); «The First International Conference on Radiation Physics and Its applications (ICRPA-1)», (Египет, 2015); «24th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics (ISINN) JINR». (Россия, 2016); «7th International Conference on Optical Spectroscopy, Laser & Their Applications», (Египет, 2016); «International Symposium on In Situ Nuclear Metrology as a tool for radioecology INSINUME», (Македония, 2017); «25th International Seminar on Interaction of Neutrons with

Nuclei: Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics (ISINN) JINR», (Россия, 2017); «26th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei», (Китай, 2018); «Школа для молодых ученых и семинар «Информационные центры ОИЯИ: задачи и перспективы»», (Россия, 2018); «1th Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-2018)», (Тунис, 2018); «14th Arab Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy», (Египет, 2018); «2nd International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry», (Венгрия, 2019); «27th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei ISSIN: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics»», (Россия, 2019); The XXV International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS), (Republic of Kazakhstan, 2021); 28th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei ISINN, Dubna – (Russia, 2021); International conference on radiation in various fields of research, RAD10, (Черногория, 2022); IV International Scientific Forum “Nuclear science and Technologies”, (Казахстан, 2022), а также на заседаниях кафедры радиэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова (2019; 2020; 2021, 2022).

Работа выполнена на кафедре радиэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова и в Объединённом Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ) в г. Дубна в рамках совместного проекта между ОИЯИ и Академией научных исследований и технологий (Academy of Scientific Research and Technology) Египта. Также в работе принимали участие коллективы кафедры радиэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова, Египетского управления по атомной энергии и ОИЯИ. Совместное участие в работе отражено в публикациях по теме диссертации. Автор выражает искреннюю благодарность всем коллективам, принявшим участие в работе и в

обсуждении ее результатов.

Связь работы с плановыми исследованиями и научными программами: Работа выполнена в рамках научных исследований по проектам ASRT–JINR (2011–2022 гг.) и проведена в сотрудничестве с Академией научных исследований и технологий Египта и ОИЯИ, а также при участии Египетского управления по атомной энергии. Материалы, послужившие основой для написания диссертации, получены и обобщены при реализации плановой темы фундаментальных научно–исследовательских работ кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова.

Публикации: Результаты исследования отражены в 23 публикациях, 16 из которых опубликованы в журналах Web of Science, Scopus, RSCI, входящих в перечень изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности «экология», а также в научных статьях в сборниках, материалах и тезисах докладов российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации: диссертация изложена на 313 страницах и состоит из введения, обзора литературы, изложения методов, результатов и их обсуждения, выводов и рекомендаций. Список литературы включает 332 наименований, в том числе 294 на английском языке. Работу иллюстрируют 41 таблиц, 92 рисунков и 3 приложения.

Благодарности: автор выражает глубокую признательность своему научному консультанту, д.б.н., С.В. Мамихину за руководство исследованиями и заведующему кафедрой радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова, д.б.н., профессору А.И. Щеглову за неоценимую помощь и поддержку. Автор благодарен всем

сотрудникам кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова. Автор также благодарит всех коллег в Объединенном институте ядерных исследований, Академии научных исследований и технологий Египта и Египетском управлении по атомной энергии.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В первой главе была обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, описана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приводятся положения, выносимые на защиту, описаны личный вклад автора, апробация работы, количество публикуемых научных статей, структура и объем диссертации.

Во второй главе представлен обзор литературы, обобщающей сведения о ландшафтных, геохимических и экологических условиях территории долины реки Нил и морских прибрежных акваторий Египта. В этом разделе представлены общие характеристики объектов исследования (река Нил и её Дельта, Красное и Средиземное моря). Также показаны их геоморфологические особенности, даны радиоэкологическая и экотоксикологическая характеристики, приведены данные по радиоактивности почв и донных отложений исследуемых территорий. Представлен обзор разных источников загрязнений долины реки Нил и морских прибрежных акваторий Египта.

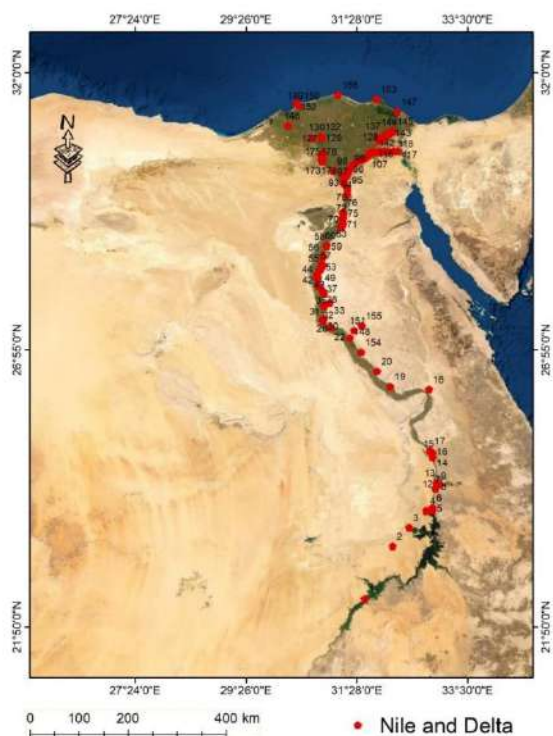
В третьей главе представлены методологические подходы и методы исследования. В общей сложности на территории исследований в соответствии с протоколом (IAEA, 2004) было отобрано 307 проб почв и речных и морских отложений (Рис. 1). В частности, по берегам реки Нил и её Дельты было отобрано 176 образцов (133 почвы и 43 донных отложений). Территория пробоотбора охватывала все доступные и наиболее населённые

районы, а также включала две ветви Нила (Розетта и Дамьетта) и сельскохозяйственные районы. В акватории Красного моря было собрано 32 образца морских отложений из 12 прибрежных районов (Марса Хумира, Вади Лахми, Район Калаан, Район Хамата, Абу-Гусун, Вади Эль-Гемаль, Шарм Эль-Бахари, Абу-Дабаб, районы Кусейр и Куэй, Сафага и Гемша). В акватории Средиземного моря вдоль побережья плотно населённых пунктов в египетских прибрежных районах, которые простираются от Порт-Саида на востоке до западных границ Александрии на Западе, было отобрано 99 образцов морских отложений. В диссертации приведено полное описание исследуемых образцов. Также полное описание пробоотбора и методика опубликованы в Arafa et al. (2015); Badawy et al. (2020). После пробоотбора подготовка проб прошла в два этапа. Первый этап был осуществлен в Египте, в лаборатории Египетского управления по атомной энергии, а второй – в лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) ОИЯИ.

Рис. 1: Места отбора проб в долине реки Нил и его дельты.

В данной работе был использован инструментальный нейтронно-активационный анализ ИНАА на базе ИБР-2. Подробное описание об аналитических методах представлено в работах (Frontasyeva et al., 2010; Badawy et al., 2018).

Также обсуждался вопрос, касающийся эквидозиметрии как понятия, объединяющего риски для человека и окружающей среды от разных факторов. В работе был рассмотрен расчёт риска от ЕРН и ТМ и их химического



влияния. Подробно рассматривается развитие эквидозиметрии и её современная трактовка.

В четвертой главе представлены полученные результаты содержания химического элементного состава в почве и отложениях на исследуемых территориях, показаны источники поступления, особенности поведения элементов, а также проводится статистическая оценка достоверности данных, приводится расчёт уровней загрязнений и определения источников загрязнения.

В пятой главе представлены полученные результаты содержания ЕРН в почве и отложениях на исследуемых территориях, проведён расчёт дозовых нагрузок, оценка радиационного риска, радиоэкологической оценки и эквидозиметрических расчётов.

В шестой главе приведены итоги работы – заключение и выводы.

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ТМ И ЕРН

Элементный состав загрязнителей почв и донных отложений реки Нил и её дельты

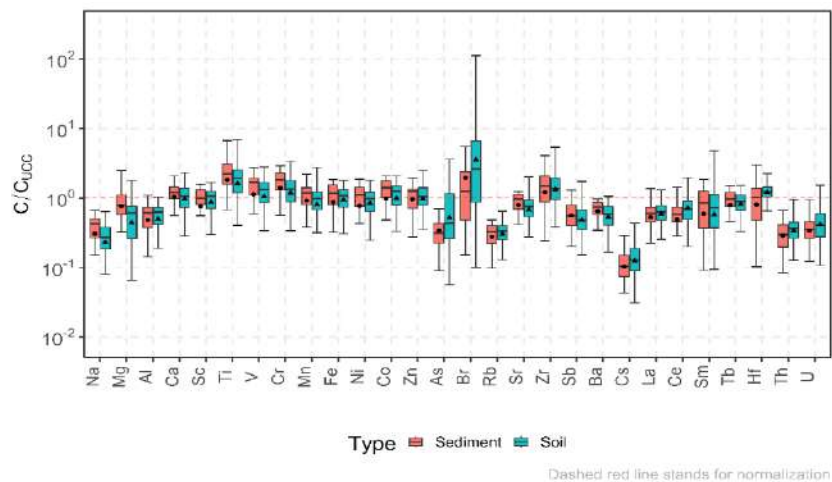
Полученные результаты являются первыми комплексными и широкомасштабными исходными данными по элементному составу почв и отложений вдоль реки Нил и её Дельты, которые были получены с помощью нейтронно-активационного анализа (НАА). Была проведена оценка элементного состава и источников загрязнения в 176 местах пробоотбора (133 почвы и 43 образца отложений вдоль) египетского участка реки Нил и её Дельты.

Было определено содержание 28 элементов (Na, Mg, Al, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, As, Br, Rb, Sr, Zr, Sb, Ba, Cs, La, Ce, Sm, Tb, Hf, Th и U). Описательная статистика полученных результатах показана на Рис. 2. По

результатам нормализации полученных концентраций очевидно, что содержание Br, Ti, Zr, Cr, V, Hf, Co, Ca, Zn, и Fe несколько выше, чем то, о котором сообщают Rudnick, Gao (2014). В целом, концентрации этих элементов в донных отложениях несколько выше или равны таковым в почвах, за исключением Hf, и это подтверждает тот факт, что существенных различий между концентрациями в почве и донных отложениях в исследуемых районах нет, как было показано в предыдущих работах (Arafa et al., 2015; Badawy et al., 2017).

Некоторые элементы, которые представляют существенный риск и имеют значительную эпидемиологическую опасность, были исследованы с точки зрения допустимых уровней содержания этих элементов в почве и донных отложениях. Среднее значение концентрации в почвах и донных отложениях As, Ba, Co, Cr, Ni и Zn ниже уровней вмешательства по сравнению с соответствующими значениями в других работах (Kabata-Pendias, 2011; Rudnick, Gao, 2014; Viers et al., 2009; Savenko, 1986; Gromet et al., 1984), и (Taylor, McLennan, 1985). Поэтому концентрации этих элементов не представляют опасности для человека.

Рис. 2: Элементный состав почв (участок № 133) и донных отложений (участок № 43)



Несмотря на снижение средних концентраций

вышеназванных элементов, в некоторых локальных местах наблюдаются значительные значения. Например, в случае As значительное количество (83

мг/кг) было замечено в профиле №100 непосредственно рядом с заводом по производству фосфатов и удобрений в Абу-Заабале. Эта особенность была доказана в другом исследовании, посвящённом прибрежным районам вдоль египетского участка Красного моря, где наблюдались значительные количества As и Cr (Badawy et al. , 2018). Получение результаты можно объяснить наличием общих характеристик, связанных с добычей фосфата и его транспортировкой.

Современные уровни содержания Br, Ti, Zr, Cr, V, Hf, Co, Ca, Zn, и Fe для долины реки Нил значительно превышают опубликованные ранее данные. По массовой доле урана, тория и редкоземельных элементов особенно выделяется юго-восток Египта, при этом содержание ТМ в почвах и донных отложениях почти одинаково. Очевидно, накопление в почвах исследуемых элементов, в основном, связано с выветриванием земной коры и поступлением их с эфиопских высот, а также в результате разлива Нила до построения плотины.

Соотношение почва/отложение равно почти единице, поэтому обсуждение касается как почвы, так и отложений (Badawy et al. , 2017). Среди обогащённых элементов в образцах содержание Ti значительно выше данных, опубликованных в других источниках. Значительное содержание Ti, скорее всего, связано с тем, что в этих регионах есть многочисленные железные, стальные, цементные и фарфоровые заводы, которые интенсивно используют сплавы Ti. Также отмечено, что концентрация Zr в полтора раза выше, чем в UCC. Показатели соотношения Zr/Sc vs Th/Sc, Th/Sc vs Sc и Hf vs La/Th были протестированы для извлечения более достоверной информации о рециркуляции и сортировке донных отложений (Badawy et al. , 2017). Эти соотношения являются хорошими индикаторами для процессов

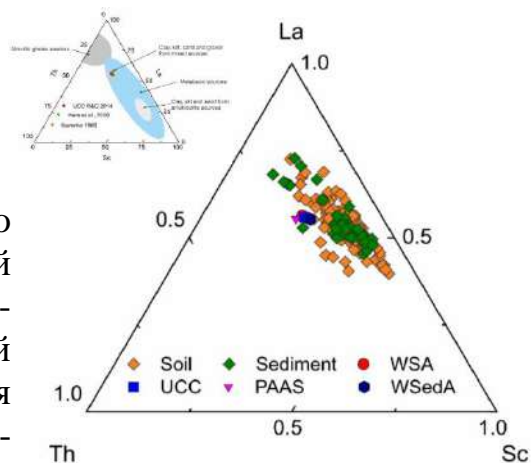
магматической химической дифференциации, поскольку торий - несовместимый элемент, тогда как Sc совместим в магматических системах (Taylor, McLennan, 1985). Оба элемента, по-видимому, переносятся в терригенном компоненте во время осадочных процессов. Поскольку Zr концентрируется в цирконах, соотношение Zr/Sc широко используется для измерения сортировки и переработки минералов (Hassan et al., 1999). В нашем случае, исходя из этих соотношений, образцы не отклоняются от первичного композиционного тренда, указывающего на низкую или устойчивую добавку циркона, наводящую на мысль о нециклическом эффекте. Эта особенность может быть объяснена отсутствием нового дополнения качества накопления осадков с момента строительства Асуанской высокой плотины, препятствующей потоку наносов в долину реки Нил (Stanley, 1996; Wahaab, Badawy, 2004). Из-за того, что Ca и Zr имеют высокие массовые доли, они слабо коррелируются с другими элементами.

Что касается соотношения между Th/U, их концентрации в почвах и отложениях широко разбросаны ниже и выше значений UCC. Эти расхождения могут объясняться отпечатками происхождения и, скорее всего, более крупнозернистой текстурой в некоторых образцах, что приводит к заметному снижению содержания тория Th (Ochoa et al., 2007). Среднее значение соотношения Th/U - Th в случае почвы и отложений составляет 0,64 и 0,93 соответственно. Это значительно выше, чем соответствующие коэффициенты 0,37 для верхней континентальной коры UCC (Rudnick and Gao, 2014), 0,3 для среднемировых отложений WSedA (Viers et al. , 2009), 0,32 для пост-архейского австралийского сланца PAAS (Taylor and McLennan, 1985), 0,33 для среднемировой почвы WSA (Kabata-Pendias, 2011).

Для получения более подробной информации о происхождении полученных элементов и о том, имеют ли они естественное вулканическое

происхождение, полезным инструментом является взаимное распределение несовместимых и неподвижных элементов, таких как Sc, V, Cr, Ni, Zr, La, Hf и Th (Badawy et al. , 2017; Taylor and McLennan, 1985). На основании этого факта была построена дискриминационная троичная диаграмма La-Sc-Th (Рис. 3).

Рис. 3: График тройной дискриминации Sc-La-Th. График показывает хорошее совпадение полученных результатов с результатами, полученными для верхней континентальной коры UCC Rudnick, Gao (2014), для среднемировых отложений WSedA Viers et al. (2009), для пост-архейских австралийских сланцев средней PASS Taylor, McLennan (1985), и для среднемировой почвы WSA Kabata-Pendias (2011).



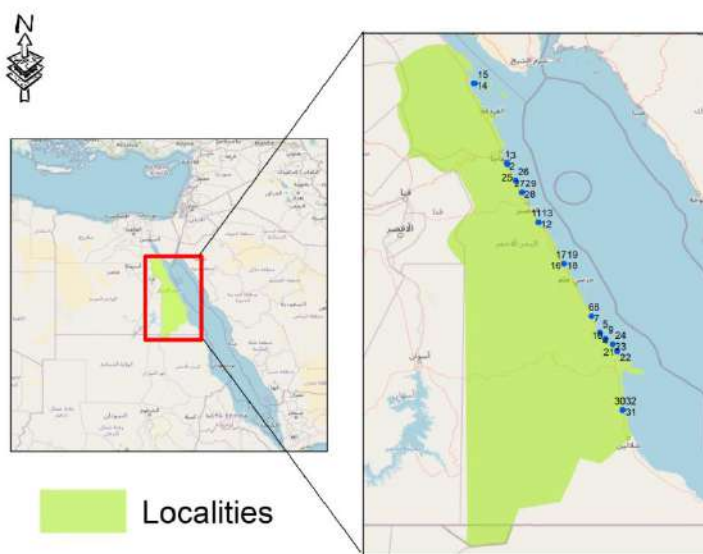
Очевидно, что образцы находятся в хорошем совпадении и попадают в область, близкую к метабазнной, глине, илу, песку и гравиию из смешанных источников, которые исключают некоторый мафический детрит (Badawy et al. , 2017). Статистический анализ полученных данных с помощью метода главных компонент PCA показал, что элементный состав почвы и донных отложений почти одинаковый. Это хорошее доказательство того, что источником минералов и элементов в почве на берегах Нила и в Дельте являются донные отложения.

Элементный состав морских отложений прибрежных акваторий Красного моря

С помощью инструментального нейтронно-активационного анализа и масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой была определена массовая доля 43 основных и микроэлементов в 32 образцах морских отложений, которые были собраны из 12 районов вдоль египетского побережья Красного моря, как показано на Рис. 4.

Рис. 4: Точки пробоотбора для изучаемой территории Красного моря.

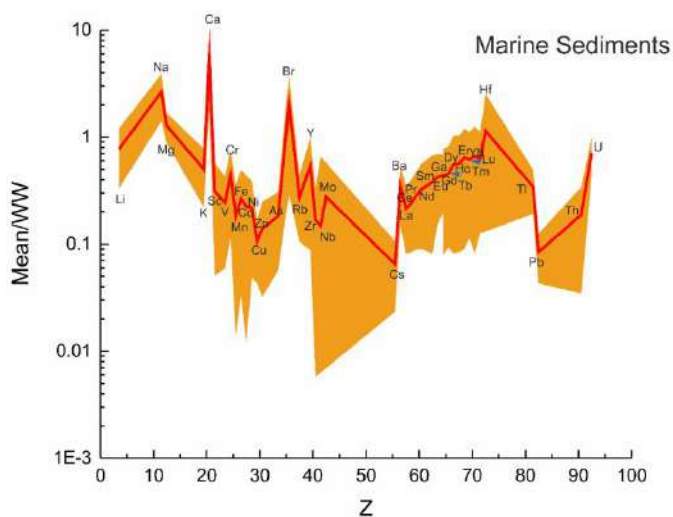
Полученные данные по морским отложениям были сравнены с соответствующими значениями в литературе.



Результат нормализации (Li and Schoonmaker, 2014) полученных данных по концентрации элементов показывает относительно высокие массовой доли и расположен в порядке убывания $Ca > Na > Br > Mg > Hf$. Несмотря на то, что массовые доли данных элементов относительно высоки, они все же ниже, чем средневзвешенные по всему миру, за исключением Ca, самое высокое значение которого было определено в районе Абу-Гусун. Это можно объяснить тем, что тёплые солёные воды Красного моря перенасыщены арагонитом и магнезиальным кальцитом. Осаждение карбоната кальция, по-видимому, ограничено этими или промежуточными водами (Ellis and Milliman, 1985).

Содержание 14 редкоземельных элементов, Th и U в 32 образцах морских отложений, собранных в 12 прибрежных районах вдоль прибрежной акватории Красного моря, приведены и внесены на Рис. 5.

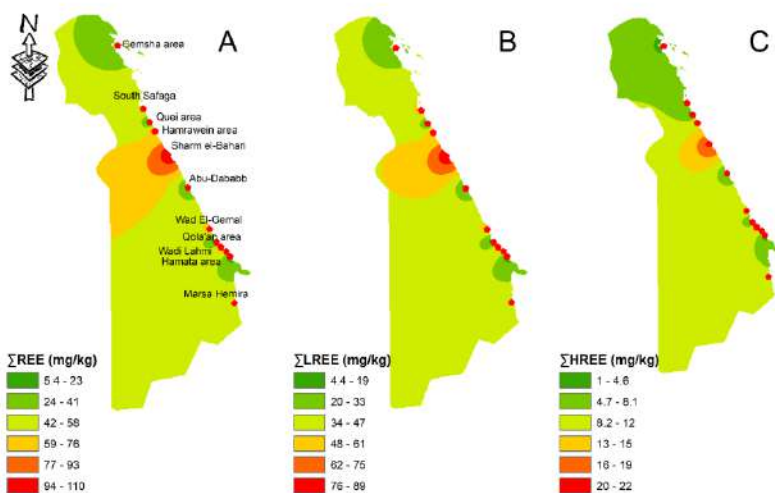
Рис. 5. Распределение нормированной массовой доли элементов относительно атомного номера Z для каждого исследуемого элемента.



В результате сравнения полученных результатов для REE, было обнаружено, что концентрация REE меньше, чем соответствующие значения для PAAS (Taylor, McLennan, 1985), NASC (Gromet et al. , 1984; Khadijehl et al., 2009) , и (Mir, 2015). Содержание REE может быть указано в порядке убывания: Шарм-эль-Бахари > Колан > Эль-Хамравейн > Южная Сафага > Марса Хумира > Хамата > Вади-эль-Гемаль > Куэй > Гемшиа > Абу-Дабаб > Вади Лахми > Абу-Гусун.

Рис. 6: пространственное распределение REE, LREE и HREE

Для изучения закономерностей распределения Σ REE, Σ LREE и

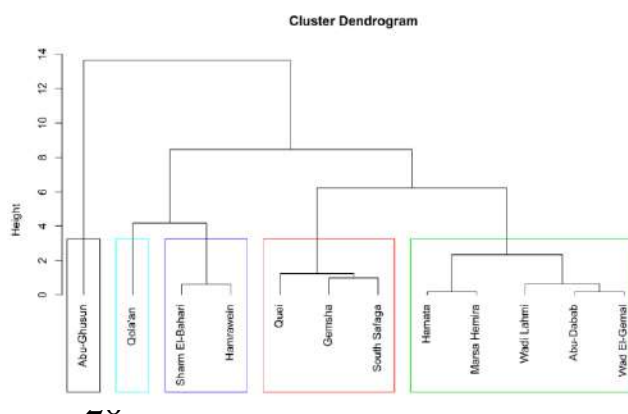


Σ HREE использовалась технология ArcGIS. Распределение элементов было интерполировано с использованием технологии ГИС, основанной на методе обратного взвешивания расстояний IDW (inverse distance weighting), как

показано на картах пространственного распределения на Рис. 6 (А–С). Из пространственных карт видно, что пиковые значения находятся в одном и том же районе Шарм-эль-Бахари. Упомянутый район характеризуется строительством прибрежных дорог, развитием туризма, добычей фосфатов и наличием морского порта, что обуславливает высокие массовые доли в Шарм-эль-Бахари (Badawy et al. , 2018).

Содержание Th (мг/кг) в исследованных морских отложениях равно $2,15 \pm 1,75$ мг/кг и колеблется от 0,1 до 7 мг/кг, в то время как содержание U (мг/кг) составляет $2,23 \pm 0,87$ и колеблется от 0,4 до 3,9 мг/кг. Полученные результаты сравниваются с результатами, взвешенными по всему миру, и соотношение $Th/U \approx 1$, по-видимому, меньше, чем сообщается Viers et al. (2009) 3.7, Martin, Meybeck (1979) 4.7, Savenko (1986) 4.2, Rudnick, Gao (2014) 3.9 в УСС и Badawy et al. (2017) 4.8 мг/кг. Снижение Th/U происходит из-за снижения содержания Th в этих районах, поскольку основными источниками этих элементов, вероятно, являются выщелачивание из местных гранитных пород и фосфатных производств, а выходы горных пород в данном районе считаются незначительными (El-TaHER, Al-Zahrani, 2014). REEs, LREEs и HREEs показывают значительные положительные коэффициенты корреляции 0,72, 0,75 и 0,59 с Th, соответственно. Коэффициенты LREE/Th и HREE/Th рассчитываются как 12,3 и 2,6 соответственно. Эти результаты почти совпадают с теми, о которых сообщили Khan et al. (2018) для LREE.

Рис. 7. дендрограмма, включающая все 12 исследованных областей, основанная на преобразовании центрированного логарифмического отношения.



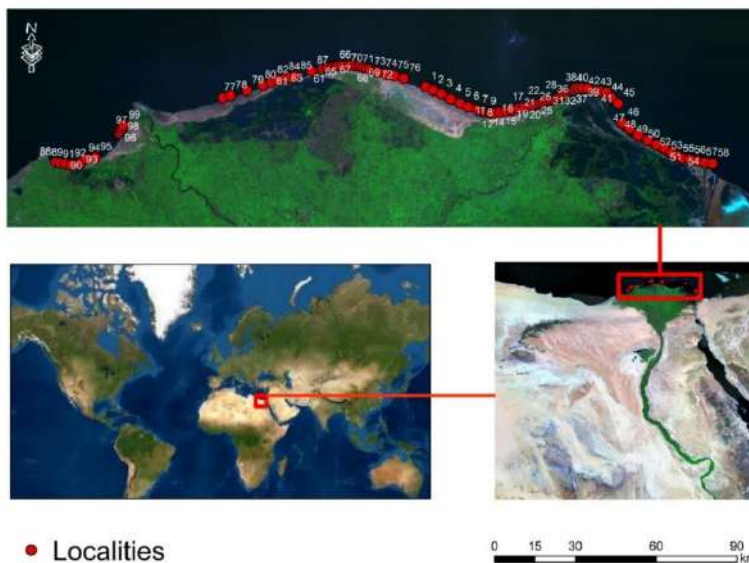
Однако для HREE наблюдается слабая положительная корреляция с Th, и это противоречит тому, что сообщается Khan et al. (2018). Это противоречие может быть объяснено снижением соотношения Th/U на 1,1 по сравнению с теми, о которых сообщалось в литературе. Напротив, для U были извлечены значимые отрицательные коэффициенты корреляции с REE, LREE и HREE. Соответственно, значительные положительные корреляции LREEs с Th и пониженным соотношением Th/U указывают на то, что содержание REE, Th и U в морских отложениях в основном определяется минералами, обогащёнными U, такими как циркон, а не минералами, обогащёнными Th, такими как монацит.

На основании евклидова метода (Euclidean method) для метрик и метода усреднения, была построена дендрограмма, иллюстрирующая хорошие корреляции между исследованными областями, как показано на Рис. 7. Как показано на дендрограмме, было образовано 5 групп, сгруппированных на основании общего геохимического состава содержания элементов исследуемых образцов.

Элементный состав морских отложений прибрежных акваторий Средиземного моря

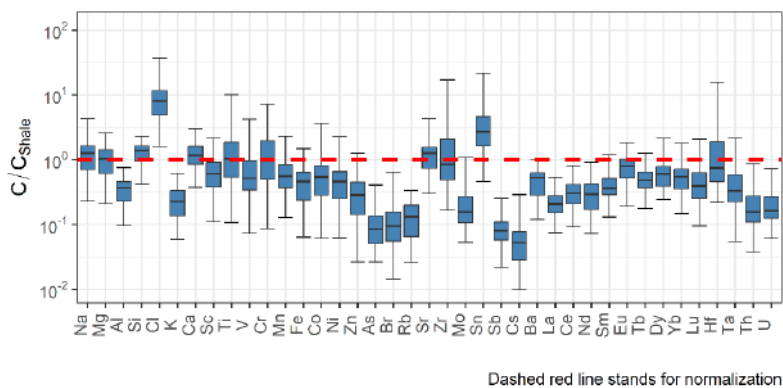
В общей сложности 39 элементов были определены в 99 пробах поверхностных отложений, собранных в трёх секторах (Рас-Эльбар, Эльбруллус и Рашид) в прибрежных районах Египта в Средиземном море как показан на карте Рис. 8.

Рис. 8: Точки пробоотбора для изучаемой территории Средиземного моря.



Массовые доли элементов были нормализованы к соответствующим значениям элементов в континентальных сланцах (Li, Schoonmaker, 2014) и проиллюстрированы на диаграмме, как показано на Рис. 9.

Рис. 9: диаграмма, иллюстрирующая нормализованные массовые доли элементов в трёх изученных секторах до соответствующих значений сланца (Li, Schoonmaker, 2014).



Представленные результаты показывают, что в донных отложениях прибрежной акватории Средиземного моря повышенными массовыми долями по сравнению с литературными данными характеризуется Cl, Sn, Zr, Hf, Ti, Cr, Ca, Na, Si, Sr, Mg, что объясняется своими причинами для каждого

из элементов Причиной повышенного содержания Cr и Sn является загрязнение донных отложения красками во время ремонта кораблей в портах Египта, на что указывают исследования (Abdel Ghani, 2015). Концентрация Ti, Zr и Hf была сопоставлена с данными, опубликованными на региональном уровне, и было установлено, что они выше, чем те (460, 0,2 и 0,85 мг/кг соответственно), о которых сообщили El-Sorogy et al. (2016). Повышенные массовые доли Cr по сравнению с таковыми (0,18 мг/кг), опубликованными El-Sorogy et al. (2016), в основном обусловлены удалением отходов в озере Эльбруллус.

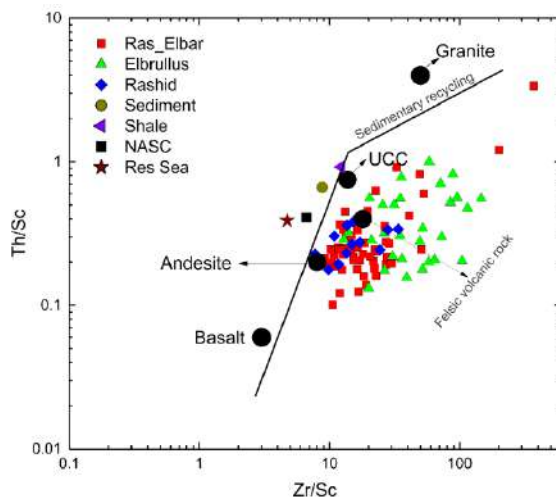
Результаты показывают, что массовые доли REE почти в два раза выше, чем в отложениях прибрежных районов вдоль египетского побережья Красного моря по El-Taher et al. (2019). Эти особенности можно объяснить существованием нескольких озёр наряду с прибрежными районами вдоль египетского побережья Средиземного моря (озера Эльбруллус, Эль-Манзала, Идку и Мариут). В этой связи предполагалось, что будут обнаружены значительные массовые доли не только REE, но и токсичных элементов. И наоборот, массовые доли REE ниже, чем те, о которых сообщают Hannigan et al. (2010) для отложений в Чесапикском заливе, США, и Lopez-Gonzalez et al. (2012) для Одиэля, Испания.

Были рассчитаны показатели соотношения для изучения происхождения элементов. Показатель соотношения Th/U составляет в среднем 4,8, 5,8, 3,6 и 2,6 для всех образцов из Рас-Эльбара, Эльбруллуса и Розетты соответственно. Сравнивая результаты с соответствующими коэффициентами для УСС (3,9) по Rudnick, Gao (2014) и среднемировых речных отложений (3,7) по Viers et al. (2009), соотношение сектора Эльбруллус показывает хорошее совпадение. Напротив, коэффициенты для сектора Рас Эльбар выше, чем показатели соотношения, сообщённые Viers et

al. (2009), и Rudnick, Gao (2014), но в соответствии с показателями соотношения для сланца (4,4) и NASC (4,6), опубликованными Li, Schoonmaker (2014) and Gromet et al. (1984) соответственно.

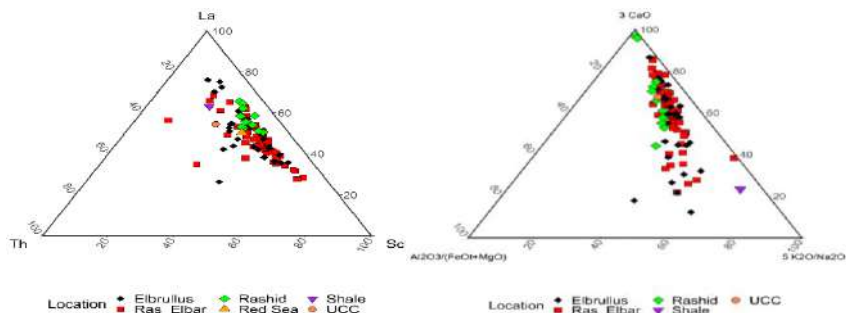
Ещё одним информативным соотношением для изучения того, происходит ли рециркуляция осадочных пород, является соотношение Zr/Sc по сравнению с Th/Sc (Рис. 10). На рисунке показана повышенную степень обогащения Zr , что свидетельствует о высокой рециркуляции отложений.

Рис. 10: Th / Sc против Zr / Sc , иллюстрирующий повышенную степень обогащения Zr , доказывающий высокую рециркуляцию отложений.



Дискриминирующая диаграмма La-Th-Sc для осадочно-тектонической обстановки образцов из прибрежных районов вдоль египетского побережья Средиземного моря показывает, что образцы, как правило, аналогичны соответствующим значениям UCC Rudnick, Gao (2014) и прибрежным отложениям Красного моря Badawy et al. (2018), соответственно, как показано на Рис. 11. Результаты хорошо совпадают с результатами сланцев Li, Schoonmaker (2014). Образцы находятся в непосредственной близости от UCC, отложений Красного моря и сланцев. Полученные результаты свидетельствуют о смешанном источнике отложений, состоящем в основном из глины, ила, гравия и мафической породы.

Рис. 11:
дискриминирующие
диаграммы La-Sc-Th и
 $CaO-Al_2O_3-K_2O/Na_2O$
иллюстрируют



происхождение прибрежных отложений.

Аналогичным образом были приведены статистические анализы полученных результатов. Был применён метод главных компонент PCA. Первые два PCA показаны на Рис. 12.

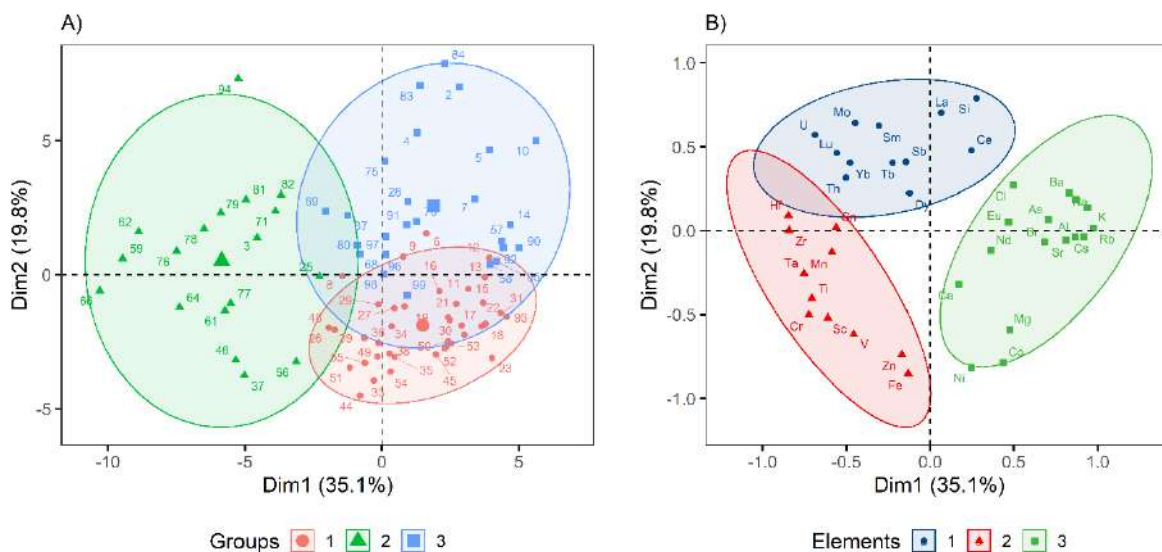


Рис. 12: двумерный график первых двух PCA профилей А) и определяющих элементов В).

На Рис. 12 А) чётко показано, что существуют три отдельные группы с разным количеством точек пробоотбора. Делая вывод, можно сказать, что эти три группы довольно сильно пересекаются из-за геохимического сходства в изученных отложениях. Аналогичным образом, элементы были сгруппированы на основе их общих геохимических признаков, как показано на Рис. 12 В). В конечном счете можно констатировать, что в определенных элементах присутствует значительный вклад земной коры и моря, а также антропогенное воздействие в некоторых профилях, что очевидно из элементов, содержащих 2-й кластер. В частности, в таких местах, как Аль-Манзала, озеро Эльбруллус и искривление прибрежных районов Абу-Кира.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ

Вследствие отсутствия региональных кларков и фоновых значений для исследуемой территории, при оценке уровней загрязнения использовался референтный геохимический фон значений УСС верхней континентальной коры. На этой основе были рассчитаны индивидуальные и комплексные индексы загрязнения, при расчете которых использовались различные коэффициенты и индексы обогащения и загрязнения.

Индивидуальные индексы загрязнения

Коэффициент обогащения (Enrichment Factor EF)

Результаты расчёта EF для реки Нил и Дельты, Красного и Средиземного морей представлены следующим образом. Среднее значение коэффициента обогащения EF для реки Нил и Дельты равно 3 и колеблется от минимального значения 0,7 до максимального значения 43,2 для отложений Нила. EF классифицируется как умеренное обогащение. Самый высокий EF наблюдался в №40 в прибрежных районах, что скорее всего связано с повышенным содержанием Вг (EF=49,7), который классифицируется как очень сильно обогащённый. Это можно объясняться выветриванием со стороны Средиземного моря. В случае морских отложений среднее значение EF было рассчитано как 10,8, что классифицируется как умеренное или сильное обогащение по мнению Karuprasamy et al. (2017).

Минимальное значение EF было зарегистрировано для Cs = 0,3, в то время как максимальное значение было отмечено для Са = 98,6. Поэтому для Са наблюдается чрезвычайно сильное обогащение. По мимо этого, Na, Mg, и Вг считаются сильными обогащениями, поскольку их значения EF составили 16,5, 14,6, и 16,2 соответственно. Высокая массовая доля Na и Вг объясняется возможным выветриванием со стороны Красного моря, поскольку эти элементы являются морскими.

Таким же образом, были рассчитаны значения EF для Средиземного моря. Минимальное значение EF было зарегистрировано для Cs = 0,16, 0,14, и 0,19, а максимальное значение для Cl = 23, 32,1 и 75,98 для Рас Эль Бар, Эльбруллус, и Розетты, соответственно. Повышенное количество Cl объясняется процессом выветривания с моря. Несмотря на это, исследуемые территории на первый взгляд можно характеризовать как экологически благополучные.

Индекс геоаккумуляции (Geoaccumulation Index) Igeo

Индекс Igeo широко используется для оценки антропогенного воздействия на почву и отложения вдоль Нила и Дельты, Красного и Средиземного морей. Igeo в всех объектах исследования ниже единицы (т.е. нет антропогенного воздействия). Индекс был рассчитан для образцов, собранных в Средиземном море, и средние значения индекса были рассчитаны для Cl: 2,5, 1,4 и 3,7 для Рас-Эльбара, Эльбрулла и Розетты.

Комплексные индексы загрязнения

Индекс нагрузки загрязнения (Pollution load index) PLI

PLI часто используется для количественной оценки степени загрязнения по всем профилям пробоотбора. Если $PLI > 1$, это означает, что загрязнение присутствует, если $PLI < 1$, загрязнение металлами отсутствует (Kowalska et al., 2018; Badawy et al., 2021).

Суммарный индекс загрязнения (Total pollution index TPI (Zc))

Оценка уровня химического загрязнения почвы или донных отложений как показателя неблагоприятного воздействия на здоровье населения проводится по показателям, разработанным в ходе комплексных геохимических и геогигиенических исследований окружающей среды городов с активными источниками загрязнения. Подход TPI очень похож на PLI и может быть рассчитан с использованием химической концентрации

элемента в почвах или в отложениях по сравнению с региональным фоновым.

Река Нил и Дельта

Полученные результаты PLI и Zc индексов реки Нил были визуализированы и нанесены на карту, как показано на Рис. 13.

Рис. 13: Пространственное распределение индекса нагрузки загрязнения PLI и суммарный индекс загрязнения Zc для Реки Нил и Дельты.

Несмотря на то, что среднее значение для всех объектов оказалось меньше единицы, было обнаружено локальное загрязнение. На карте

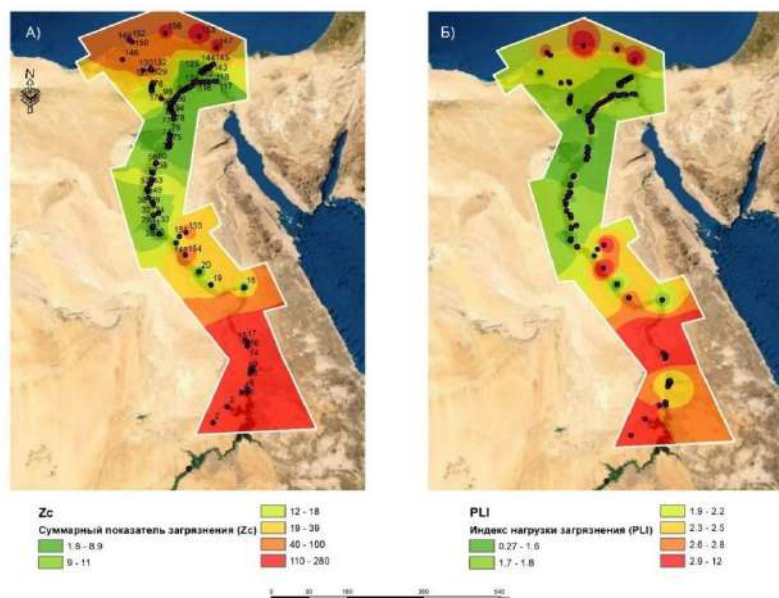


Рис. 13 показано, что пиковые точки PLI расположены в верхнем Египте и вдоль Средиземного моря. В верхнем Египте, как сообщалось Harb et al. (2016), было выявлено повышенное содержание урана и редкоземельных элементов. Таким же образом, результаты расчёта Zc были нанесены на карту (Рис. 13) и показали, что среднее значение Zc 30,2 может классифицироваться как фактор увеличения общей заболеваемости. Значение Zc варьируется от 1 для точки № 10 до 303,7 для точки № 57, где расположен город Хелуан, известный высокой концентрацией предприятий по производству сплавов металлов.

Были рассчитаны геохимические спектры и получены следующие формулы загрязнения почв и донных отложений. Донные отложения:

Br_{37.2}As_{2.4}Ti_{2.9}Ce_{1.2}U_{1.2}Zr_{2.3}Sm_{1.5}Cr₂V_{1.8}Sb_{1.8}Hf_{1.8}Ca_{1.4}Co_{1.6}Zn_{1.5}Al_{1.1}Sr_{1.1}Fe_{1.4}Ni_{1.4}Mn_{1.6}Sc_{1.3}Mg_{1.7}Tb_{1.2}La_{1.2}Th_{1.6}Ba_{1.1}. Почвы: Br_{34.3}As_{2.5}Ti_{2.4}Ce_{2.4}U_{2.3}Zr_{1.8}Sm_{1.7}Cr_{1.7}V_{1.6}Sb_{1.6}Hf_{1.5}Ca_{1.5}Co_{1.5}Zn_{1.4}Al_{1.4}Sr_{1.4}Fe_{1.3}Ni_{1.3}Mn_{1.3}Sc_{1.3}Mg_{1.3}Tb_{1.2}La_{1.1}Th_{1.1}Ba_{1.1}.

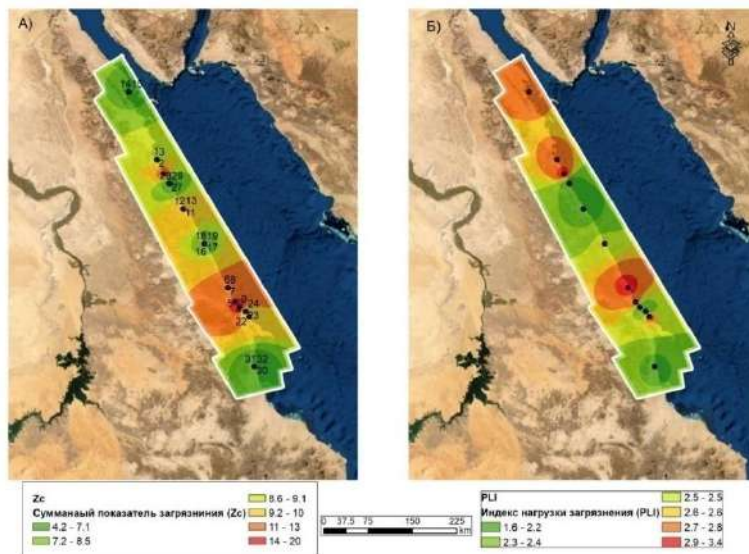
В результате расчётов на основе двух подходов были выделены различные зоны загрязнения и показано практически абсолютное совпадение зон. Это свидетельствует о достоверности полученных результатов и высокой неоднородности уровней загрязнения и экологических рисков на исследуемой территории.

Красное море

Рассчитанные аналогичным образом индексы нагрузки PLI и TPI для прибрежных акваторий Красного моря по абсолютной величине почти на порядок ниже, чем для долины Нила.

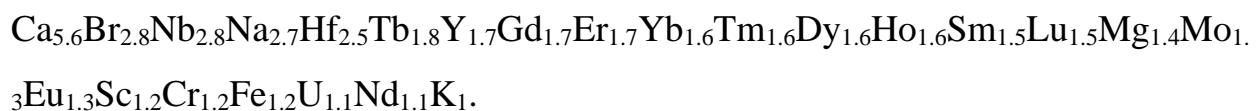
Рис. 14: пространственное распределение индекс нагрузки загрязнения PLI и суммарный показатель загрязнения Zc для Красного моря.

Среднее значение PLI составило 2,4, что позволяет классифицировать эту территорию как загрязнённую относительно категории



интерпретаций. PLI был рассчитан с диапазоном с 1,4 для точки № 28 (Эль-Хамравейн район) до 4,3 для точки № 6 (Вади Эль-Гемаль). Результаты расчёта внесены на карту (Рис. 14). Три региона, где наблюдается значительное количество PLI: Гемша (№14), Вади Лахми (№22), Куэй (№25), Вади-эль-Гемаль (№6). Также был рассчитан и нанесён на карту Zc. В

соответствии с критериями интерпретации Z_c , можно сделать вывод, что в данных регионах увеличен индекс суммарного загрязнения, что является фактором увеличения общей заболеваемости и требует дополнительного внимания со стороны регулирующих органов. Полученные формулы загрязнения морских отложений определяемых элементов в морских отложениях Красного моря были рассчитаны и представлены следующим образом:



Район Шарм-эль-Бахари, расположенный в городе Эль-Кусейр, имеет относительно повышенные концентрации всех шести загрязнителей (Zn, As, Cr, Pb, Ni и Cu), что может объясняться наличием морского порта и соответствующих промышленных предприятий. Была отмечена значительная концентрация мышьяка, что объясняется следующими факторами: : естественное геологическое присутствие в местных коренных породах, богатые мышьяком геотермальные жидкости, вступающие в контакт с поверхностными водами, фосфорными удобрениями и золой. Результаты исследования были сопоставлены с соответствующими опубликованными значениями для Красного моря Саудовской Аравии, и между ними наблюдается хорошее соответствие.

Средиземное море

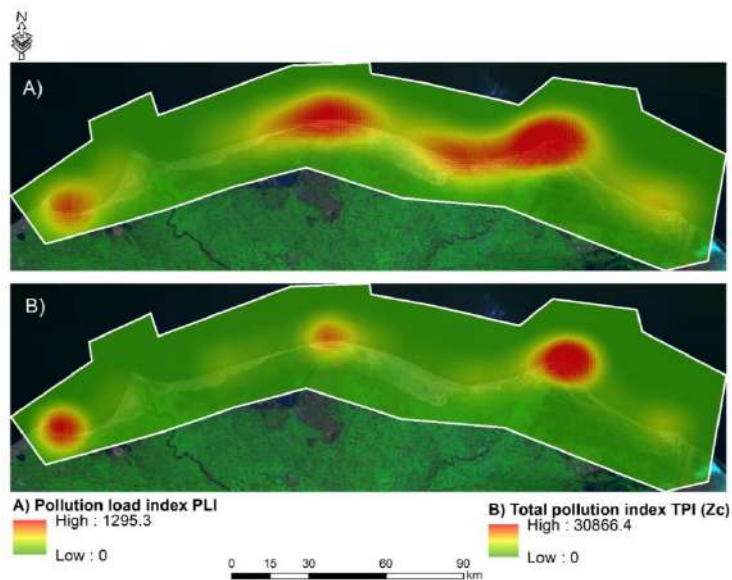
Таким же образом были рассчитаны PLI и Z_c . Значения PLI, превышающие единицу, указывают на прогрессирующее ухудшение качества морских отложений, как сообщал Abdel Ghani (2015). Комплексные индексы загрязнения для прибрежных акваторий Средиземного моря близки к таковым, рассчитанным для Красного моря. Это свидетельствует о схожести

экологической ситуации на этих территориях. Распределение плотности индекса нагрузки загрязнения PLI нанесено на карту Рис. 15 А), где показаны четыре основных местоположения, которые можно классифицировать как сильно загрязнённые. Сильно загрязнёнными местами являются i) прибрежная зона вместе с озером Аль-Манзала, ii) устье реки Нил в море (район Лесан - Рас-Эльбар) и простирающееся на запад iii) выход озера Эльбруллус в море и, наконец, iv) изгиб Абу-Кира.

Рис. 15: Плотность распределение индекс нагрузки загрязнения PLI и суммарный показатель загрязнения Z_c для средиземного моря.

Что касается Z_c , этот индекс классифицируется как умеренно опасный для точек 14, 7 и 5 в секторах Рас-Эльбар, Эльбруллус и Розетта и может быть фактором

увеличения общей заболеваемости. Кроме того, опасный уровень был зарегистрирован в точках 4, 7 и 1 для секторов Рас-Эльбар, Эльбруллус и Розетта. Исходя из категорий Z_c , на этих участках наблюдается общий рост детской заболеваемости, в частности, хронических заболеваний и нарушений функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Чрезвычайно опасный TPI был замечен для двух участков (№ 88 и 89) в Рас-Эльбаре и двух других участков (№ 40 и 42) в Розетте. Распределение плотности общего индекса загрязнения было нанесено на карту и проиллюстрировано на Рис. 15 В).



Полученные формулы загрязнения морских отложений определяемыми элементами в морских отложениях Средиземного моря были рассчитаны для трёх секторов и представлены следующим образом: Рас эль Бар: Cl_{9.2} Sn_{3.6} Zr_{3.4} Hf_{2.5} Cr₂ Ti_{1.8} Na_{1.4} Ca_{1.4} Sr_{1.4} Si_{1.3} Mg_{1.2} Eu₁ V_{0.9} Sc_{0.8} Dy_{0.8} Co_{0.8} Yb_{0.8} Mn_{0.7} Fe_{0.7} Tb_{0.7} Ni_{0.6} Ta_{0.6} Lu_{0.6} Ba_{0.6} Nd_{0.5} Ce_{0.5} Sm_{0.4} Al_{0.4} Zn_{0.4} Th_{0.4} U_{0.3} La_{0.3} K_{0.3} Br_{0.2} Rb_{0.2} Mo_{0.2} As_{0.1} Sb_{0.1} Cs_{0.1}. Геохимический спектр имеют максимальное значение для Cl и минимальное значение для Cs со средним значением 1,1; Эль Буруллус : Sn_{7.1}, Cl_{6.2}, Zr_{3.5}, Hf_{3.2}, Ti_{2.7}, Cr_{1.7}, Si_{1.4}, Ca₁, Mn_{0.9}, Dy_{0.8}, Na_{0.8}, V_{0.8}, Mg_{0.8}, Lu_{0.7}, Sr_{0.7}, Sc_{0.7}, Yb_{0.6}, Ta_{0.6}, Eu_{0.5}, Sm_{0.5}, Tb_{0.5}, Mo_{0.4}, Fe_{0.4}, U_{0.3}, Co_{0.3}, Ba_{0.3}, Th_{0.3}, Ni_{0.3}, Ce_{0.3}, Zn_{0.2}, La_{0.2}, Al_{0.2}, Nd_{0.2}, K_{0.1}, Sb_{0.1}, As_{0.1}, Rb_{0.1}, Br_{0.1}, Cs₀. Геохимический спектр имеют максимальное значение для Sn и минимальное значение для Cs со средним значением 1,01; Розетта: Cl_{32.4}, Sn_{7.3}, Ca_{2.6}, Na_{2.4}, Sr_{1.8}, Br_{1.6}, Si_{1.3}, Zn_{1.1}, Mg_{1.1}, Ti₁, Hf_{0.7}, Zr_{0.7}, Eu_{0.6}, Cr_{0.6}, V_{0.6}, Ba_{0.5}, Dy_{0.5}, Sm_{0.5}, Mo_{0.5}, Sc_{0.5}, Mn_{0.5}, Tb_{0.4}, Co_{0.4}, Yb_{0.4}, Ni_{0.4}, Lu_{0.4}, Al_{0.4}, Fe_{0.4}, Ta_{0.3}, K_{0.3}, Ce_{0.3}, La_{0.3}, U_{0.2}, Nd_{0.2}, As_{0.2}, Rb_{0.1}, Th_{0.1}, Sb_{0.1}, Cs_{0.1}. Геохимический спектр имеют максимальное значение для Cl и минимальное значение для Cs со средним значением 1,6.

Модифицированный индекс загрязнения (Modified pollution index MPI)

Для донных отложений реки Нил и Дельты был рассчитан индекс MPI и результаты индекса показали, что минимальное значение 0.9 было определено для точки № 95, а максимальное значение 690,1 - для точки № 147, среднее значение ± стандартная ошибка составили 36.6 ± 18. Также индекс MPI был установлен для почвы, где среднее значение ± стандартная ошибка составили 24.5 ± 5.3 и диапазон от 1.1 до 384,1 для точек 61 и 2, соответственно. MPI был рассчитан для прибрежных районов египетской

акватории Красного моря, и результаты показывают, что среднее значение \pm SE составляет $71,4 \pm 24,7$ с диапазоном от 4,1 до 587,3 для местоположений № 9 и 5 соответственно. Максимальное значение было отмечено для района Абу-Гусун.

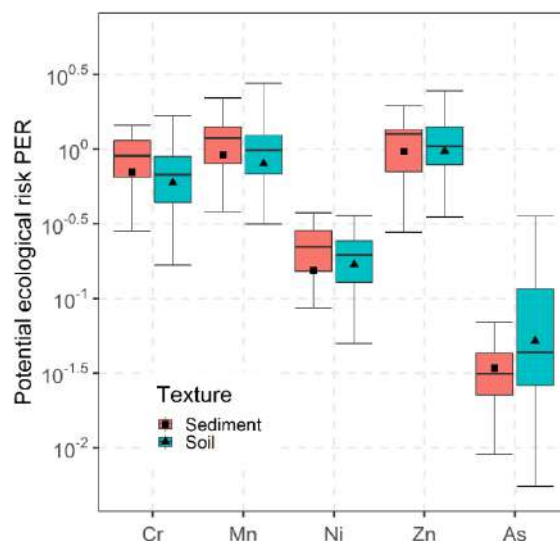
Аналогичным образом MPI был рассчитан для прибрежных районов египетского Средиземного моря, и результаты показали, что: для сектора Эль Буруллус, среднее значение \pm SE составляет $29,9 \pm 5,3$. минимальное и максимальное значения варьируются от 10,6 до местоположения № 76 и 150 до местоположения № 85 соответственно. А для Розетты, $53,9 \pm 9,8$ с диапазонами от 13,9 до 128 для точек 94 и 88, соответственно. В итоге среднее значение и SE для Рас-Эльбара было рассчитано как $17,4 \pm 1,9$. Минимальными и максимальными значениями являются 5 и 59,5 для точек № 33 и 2, соответственно. Точки с максимальными значениями близки к впадению Нила в море и к озеру Эль-Буруллус, где значительное загрязнение заметно из-за неконтролируемого выброса отходов.

Индекс потенциального экологического риска (potential ecological risk index PER) и индекс риска (RI)

PER был рассчитан для некоторых выбранных элементов, которые считаются высокотоксичными (Cr, Mn, Ni, Zn, и As) (U. S. EPA, 1992).

Индекс реакции на потенциальную токсичность (RI) — это единый индекс, объединяющий все интересующие металлы. Результаты расчета для почвы и отложений реки Нил на Рис. 16.

Рис. 16: Индекс потенциального экологического риска PER для почвы и донных отложений Реки Нил.



Сравнивая полученные результаты со значениями категорий интерпретации, можно сделать вывод об отсутствии значимых значений PER и RI. Что касается морских отложений Красного и Средиземного морей, для них также были рассчитаны PER и RI были также рассчитаны, полученные значения всех элементов незначительны, что говорит об отсутствии какой-либо угрозы или опасности.

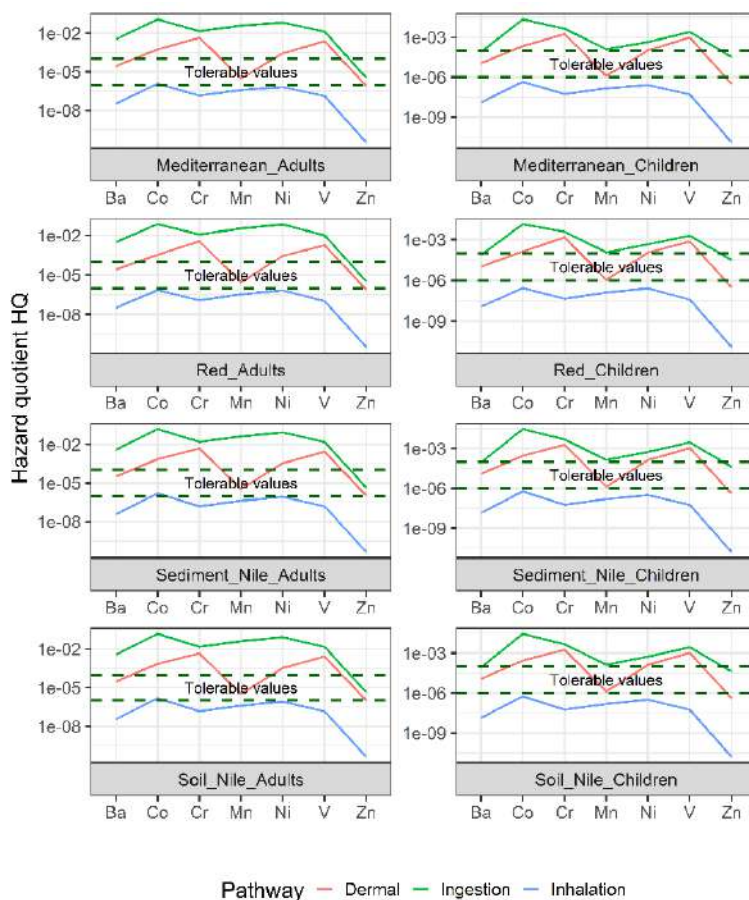
ОЦЕНКА И ХАРАКТЕРИСТИКА РИСКОВ

Есть две категории особенно подверженных воздействию людей: дети (1–6 лет) и взрослые. В целом, существует три основных пути воздействия металла: (1) ингаляционный, (2) пероральный и (3) дермальный контакт.

Рис. 17: коэффициент опасности HQ от хемотоксикантов.

В данной работе рассматриваются только канцерогенные риски. Рассчитанные результаты канцерогенного риска приведены в таблицах в тексте диссертации. Также результаты были показаны на Рис. 17. Результаты показали, что риск, рассчитанный на основе

элементов (Cr, Ni, Co, Zn, Mn, и Ba) в исследованных областях, для детей немного ниже, чем для взрослых. Кроме того, коэффициенты опасности для детей и взрослых превышают допустимые значения, за исключением Zn.



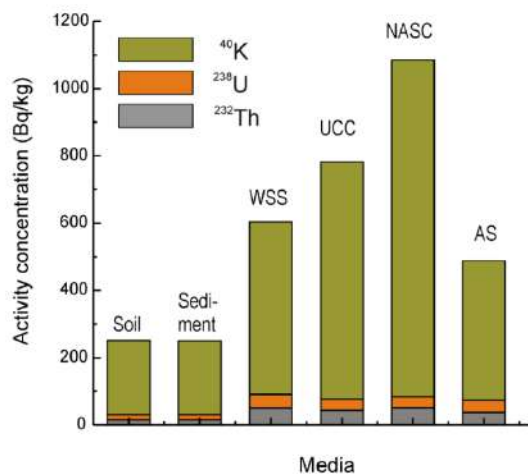
Допустимые значения индекса канцерогенного риска для человека от отдельного хемотоксиканта всем путями, рекомендованные, варьировались от 1×10^{-6} до 1×10^{-4} . Кроме того, результаты показывают, что наибольший вклад в риск вносит путь поступления с пищей (пероральный).

Полученные результаты HQ показывают, что максимальные значения в основном связаны с поступлением Co через пероральный путь, а минимальные значения – с ингаляционным поступлением Zn. Эти результаты были сопоставлены с допустимыми значениями (US EPA, 2017), и было установлено, что они превышают допустимые значения в случае Co (перорально) и ниже допустимого значения для Zn (ингаляционно). Расчёт показателей риска RI путём суммирования всех HQ для каждого элемента, поступающего в организм всеми путями, показал, что значение RI меньше единицы. Это свидетельствует об отсутствии существенного риска на человека на исследуемых территориях.

В пятой главе представлены результаты содержания радионуклидов в почвах и донных отложениях долины Нила и морских прибрежных акваториях Египта (Красное и Средиземное моря). Также в этом разделе приведены и представлены результаты расчёта эквидозиметрических параметров и соответствующих рисков.

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

Река Нил и дельта Наземные излучения окружающей среды коррелируют с геологическим и геохимическим составом каждой литологической единицы, будучи неразрывно связанными с местным содержанием ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U (Faure, 1986).



Получены нами результаты удельной радиоактивности ЕР представлены на

Рис. 18.

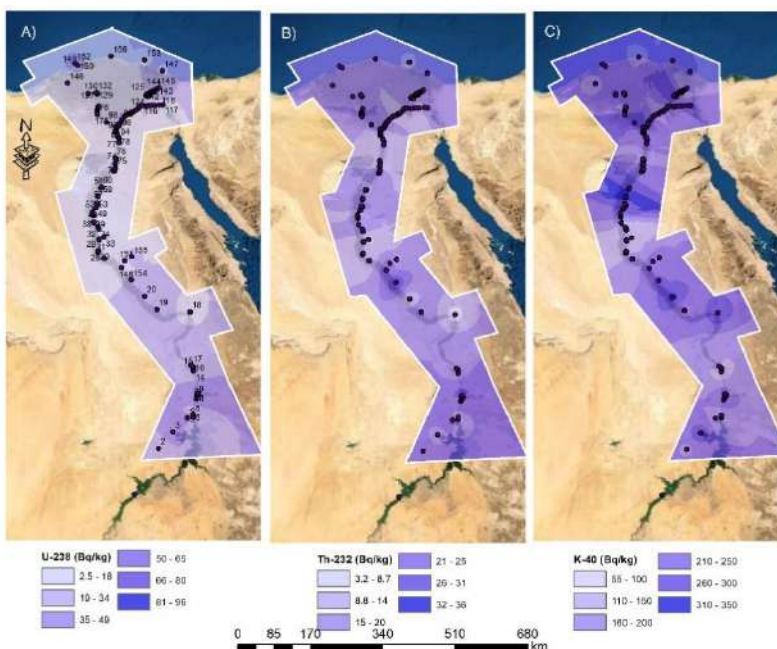
Рис. 18: Концентрация активности ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U в почве и отложениях Нила, а также соответствующие значения из литературы.

Полученные результаты были сравнены с соответствующими литературными данными для базальта, гранита и карбонатов: (Turekian, Wedepohl, 1961), Мировые взвешенные отложения (WSS) (Viers et al. , 2009), Верхняя континентальная кора (UCC) (Rudnick, Gao, 2014), Североамериканский сланцевый композит (NASC) (Gromet et al. , 1984) и Средняя почва AS (Kabata-Pendias, 2011) для тория, урана, и калия (Vinogradov, 1959). Сравнение показывает, что результаты радиоактивности ЕР меньше, чем соответствующие данные из литературы. Анализ дисперсии ANOVA был развернут для почвы и отложений, и результаты показали, что между ними почти нет существенной разницы. Соотношение между ЕР в почве и отложениях составляет 0,99.

Это хорошо согласуется с исторической информацией о ежегодных разливах Нила, которые покрывали всю долину Нила отложениями. Кроме того, распределение радиоактивности радионуклидов в почве и отложениях проиллюстрировано на Рис. 19.

Рис. 19: Зависимость концентрации активности ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U от широты

Очевидно, что радиоактивность ^{238}U в обеих средах и



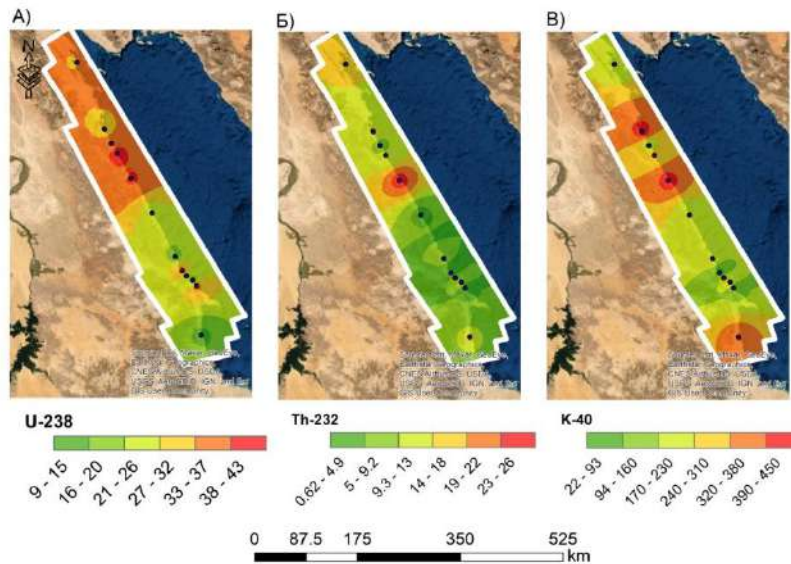
радиоактивность ^{232}Th в почвах уменьшаются по направлению к дельте Нила, в то время как радиоактивности ^{40}K в почве и отложениях и радиоактивность ^{232}Th в отложениях демонстрируют противоположное поведение, т. е. медленно увеличиваются по направлению к Дельте. В случае урана во всех средах и тория в почвах возможное объяснение этой особенности состоит в существовании более высокой радиоактивности трикальцийфосфата в Верхнем Египте по сравнению с таковыми в Нижнем Египте. Действительно, в Верхнем Египте находится несколько фосфатных шахт и заводов, которые могут быть причиной высокого содержания ^{238}U в почве и отложениях. Можно сделать вывод, что удельные активности урана и тория и их распределение близки на исследуемой территории. Наибольшее значение удельной активности урана и тория отмечается на юге в зоне добыче урана и в устье Нила в зоне аккумуляции глины.

Красное море

В результате измерения было обнаружено, что активность К-40 колеблется от минимального значения 18,2 Бк/кг в точке № 26 до максимального значения 534 Бк/кг в точке № 2 со средним значением \pm стандартная ошибка (SE) 241 ± 23 Бк/кг. Радиоактивность U-238 составила от 4,97 Бк/кг в точке № 24 до 48,5 Бк/кг в точке № 13 со средним значением \pm стандартная ошибка $27,73 \pm 1,9$ Бк/кг Рис. 20.

Рис. 20: Пространственное распределение радиоактивности вдоль Красного моря.

Аналогичным образом радиоактивность Th-232



колебалась в пределах 0,41–28,77 Бк/кг и ее среднее значение составило $8,82 \pm 1,27$ Бк/кг. Полученные результаты для Th-232 и U-238 меньше, чем соответствующие значения для донных отложений реки Нил (≈ 15 Бк/кг).

Соотношение между концентрациями активности U-238 и Th-232 в морских отложениях Красного моря и результаты показали, что количество U-238 в исследуемых объектах значительно выше, чем Th-232. Эту особенность можно объяснить наличием фосфатных рудников и морского порта, а также характером геологических особенностей юго-восточной пустыни Египта и выветриванием из фосфатных рудников и песка.

Средиземное море Полученные результаты удельной активности Бк/кг представлены на Рис. 21.

Рис. 21: активности ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U в отложениях Средиземного моря, а также соответствующие значения из литературы.

Из рисунка совершенно ясно, что полученные результаты для исследуемых объектов меньше соответствующих значений, сообщаемых в литературе по

Viers et al. (2009) для AS (512.7, 49.7, 41.0 Бк/кг для ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U , соответственно), Rudnick, Gao (2014) для UCC (705.2, 43.2, 33.6 Bq/kg для ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U , соответственно), Li, Schoonmaker (2014) для сланца и базальтовых отложений (807, 49.3, 33.6 Bq/kg для ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U , соответственно). Полученные результаты U-238 и Th-232 сравнивались с опубликованными по всему миру и строились, как в

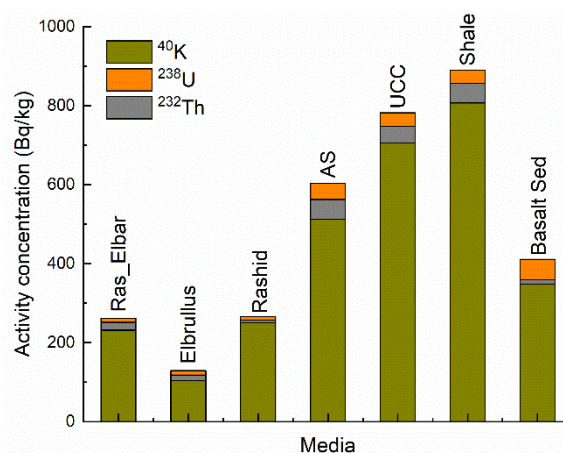


Рис. 22. Рисунок показал, что концентрация активности Th-232 выше, чем у U-238, что можно объяснить высоким содержанием Th-232 в черном песке, в частности, в секторе Розетта.

Рис. 22: иллюстрация распределения соотношения U-238 и Th-232 вдоль прибрежных районов египетского Средиземного моря.

Общие концентрации активности почвы и отложений наносятся на график и визуализируются на .

Рис. 23: иллюстрация распределения соотношения U-238 и Th-232 по всему Египту. Сравнение с литературой представлено.

Из рисунка видно, что концентрации активности довольно близки друг к другу в

начале двумерного графика, тогда как при высоких концентрациях они сильно диспергированы. Эти особенности, скорее всего, обусловлены влиянием других факторов на увеличение концентраций и большими вариациями от геологического расположения к другому (Tzortzis et al. , 2003; Tzortzis, Tsertos, 2005).

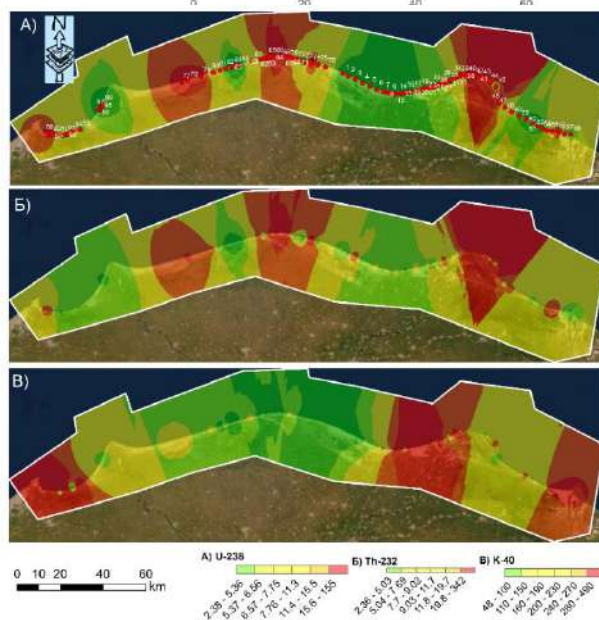
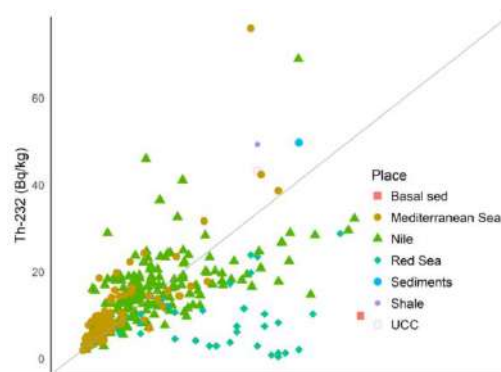


Рис. 24: пространственное распределение ЕР вдоль прибрежных районов Средиземного моря

Дозовые нагрузки

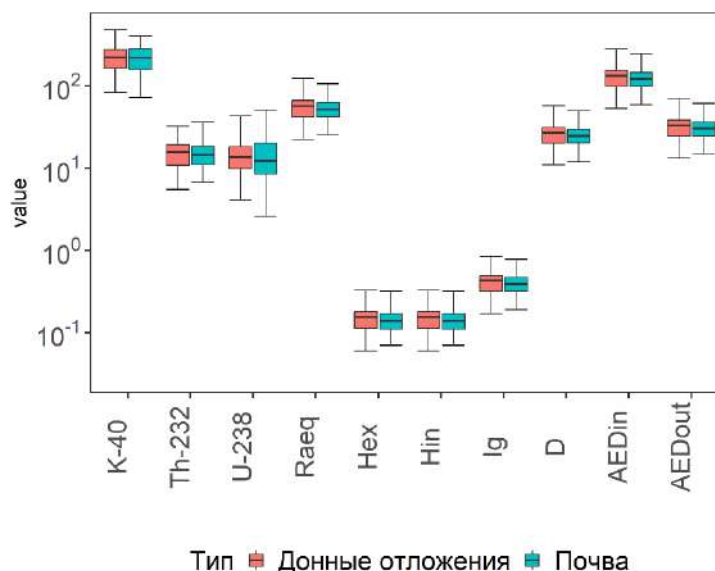
Для объектов исследований были рассчитаны дозовые нагрузки, а именно мощность поглощённой дозы D (нГр/ч), мощность годовой эффективной дозы в помещении AED_{in} и на открытом воздухе AED_{out} (Зв) и эквивалент радия (R_{aeq}).

Река Нил и Дельта

Результаты расчёта радиэкологических параметров представлены на Рис. 25. Очевидно, что существенных различий между средними значениями радиэкологических параметров почвы и отложений вдоль долины и Дельты Нила нет. Согласно публикациям НКДАР ООН (UNSCEAR, 2000) рекомендуемые значения составляют: 59 нГр/ч - для мощности поглощённой дозы D , 70 мЗв/год - для мощности годовой эффективной дозы в помещении AED_{in} , 410 мЗв/год для мощности годовой эффективной дозы на открытом воздухе AED_{out} , и 370 Бк/кг для эквивалента радия (R_{aeq}) Все полученные значения оказались ниже и не представляют опасности.

Рис. 25: радиэкологические параметры для отложений и почвы Нила и Дельты.

Также были рассчитаны индексы радиационного риска и представлены на Рис. 25, а именно, индексы внешней

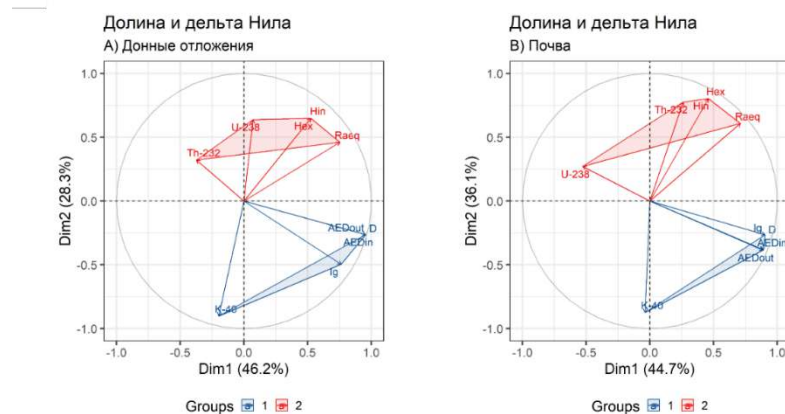


N_{ex} и внутренней N_{in} опасности и репрезентативный уровень индекса I_{γ} . Полученные значения внешней N_{ex} и внутренней N_{in} опасности меньше единицы, следовательно эта доза не может привести к возникновению онкологических заболеваний и также остальные радиоэкологические параметры. Для получения дополнительной информации о вкладе каждого отдельного параметра и его связи с другими был проведен анализ главных компонент PCA. Результаты первых двух компонент проиллюстрированы на Рис. 26 А) и В). На рисунке показано, что существует три кластера, среди которых U-238 и Th-232 имеют разное поведение. Эта особенность может быть объяснена разницей в соотношении Th-232/U-238, которое должно быть около (3,4) по сравнению с опубликованными. В обоих случаях соотношение почти равно единице. Значения ниже единиц указывают на то, что среда является восстановителем или существует внешний источник частиц, загрязненных U. Значения, превышающие единицу, показывают либо истощение урана, либо обогащение тория из-за изменений естественных процессов в этих областях. Сильная корреляция содержания урана и тория в образцах отражает их одинаковое происхождение. Результаты исследования могут быть использованы в качестве базовых радиометрических данных для будущих седиментологических исследований.

Рис. 26: PCA для дозиметрических параметров из Нила и дельты.

На рисунке показано, что уран имеет положительную

корреляцию с эквивалентом радия и показателями опасности и в меньше



степени K-40 и Th-232 в случае отложений А). В то время как для почвы замечено, что Th-232 имеет положительную корреляцию с теми же показателями В). Эти исходы можно объяснить незначительной разницей концентрации активности Th-232 и повышенными значениями U-238 над Th-232 в отложениях и почве.

Красное море

Аналогичным образом были рассчитаны концентрации радиоактивности естественных радионуклидов и связанные с ними индексы опасности в морских отложениях вдоль прибрежных районов египетского Красного моря, как показано на Рис. 27. Все радиоэкологические параметры оказались ниже рекомендованных НКДАР (UNSCEAR, 2000). Например, эквивалент радия был рассчитан как $R_{aeq} = 58,92 \pm 3,66$ Бк/кг, мощность поглощённой дозы $D = 28,29 \pm 1,73$ рГр/ч, мощность годовой эффективной дозы в помещении AEDin и на открытом воздухе AEDout (Зв) $138,76 \pm 8,49$ и $34,69 \pm 2,12$, соответственно.

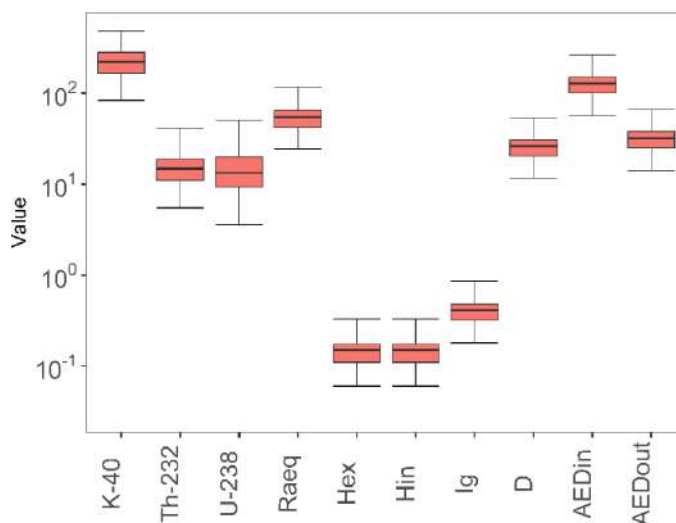


Рис. 27: радиоэкологические параметры для отложений Красного моря

Были рассчитаны индексы внешней H_{ex} и внутренней H_{in} опасности и репрезентативный уровень индекса I_{γ} , и оказалось, что они меньше единицы. Таким образом, можно сделать вывод, что воздействие морских отложений вдоль египетской акватории Красного моря не представляет какой-либо

существенной опасности с точки зрения радиологической безопасности. Результаты применения метода главных компонент показывают, что вклад урана в дозиметрические значения существенен по сравнению с вкладом калия и тория. Анализ показывает два кластера, где Th-232 и K-40 сгруппированы вместе, и это, скорее всего, высокое значение U-238 по сравнению с Th-232 и небольшой вклад K-40 в формирование дозовых нагрузок.

Средиземное море

Дозовые нагрузки и связанные с ними индексы риска для морских отложений вдоль прибрежных районов египетской акватории Средиземного моря были рассчитаны для трех секторов: Розетта, Эль-Буруллу и Рас Эль-Бар. При сравнении дозиметрических параметров исследуемых объектов обнаружилось неравномерное распределение радиоактивности по исследуемым территориям. Значение R_{aeq} для Рас Эль Бара составило 56,3 Бк/кг, что выше соответствующих значений в двух других секторах 38,6 и 37,5 Бк/кг соответственно для Эль-Буруллу и Розетты. Кроме того, средний показатель общего R_{aeq} равен 48,8 Вк/кг. Полученные результаты показывают, что они значительно меньше, чем те, о которых сообщает (UNSCEAR, 2000). Аналогичным образом, значение рассчитанных индексы опасности H_{in} и H_{ex} меньше единицы, что свидетельствует об отсутствии существенная опасность от воздействия отложений. Мощность поглощённой дозы была рассчитана для трёх секторов, средние значения составляют 26,4, 17,7 и 18,5 нГр/ч для Рас Эль-Бара, Эль-Бурллу и Розетты. Что касается годовой эффективной дозы на открытом воздухе и в помещении, то средние значения были рассчитаны как 32,4 и 129,3; 21,8 и 87; 22,7 и 90,9 μ Зв, для Рас Эль-Бара, Эль- Бурллу и Розетт, соответственно. Результаты отображены на Рис. 28.

Рис. 28: радиоэкологические параметры для отложений Средиземного моря.

Аналогичным образом, проводился PCA для увязки дозиметрических параметров на основе их общих признаков. Результаты показывают, что Hex, Raeq, AEDin, AEDout, Ig, and D вносят большой вклад в первый PCA,

а затем они хорошо сгруппированы. В отличие от этого, U-238, Th-232 и Hin имеют меньший вклад в PCA1 и высокий вклад в PCA2. Поэтому они сгруппированы вместе. Таким образом, мы можем делать вывод, что уран и торий вносят большой вклад в формирование дозовых нагрузок.

Из приведенного выше обсуждения, мы можем обобщить полученные результаты, как это ясно показано на рисунке ниже (Рис. 29). На рисунке показан значительный вклад Th-232, обнаруженный в прибрежных районах египетской акватории Средиземного моря и в некоторых местах вдоль египетского побережья Красного моря. Вероятно, повышенное количество Th-232 связано с наличием черного песка на северо-западе Египта и добычей фосфатов на юго-востоке Египта. Точно так же было замечено, что U-238 находится немного выше в реке Нил и Дельте, чем в прибрежных районах морей. Эта особенность может быть объяснена характером глинистой почвы вокруг двух берегов реки и Дельты и избыточным использованием удобрений в сельскохозяйственных целях. Такое же объяснение можно дать повышенным концентрациям K-40 в речных и дельтовых отложениях и почве.

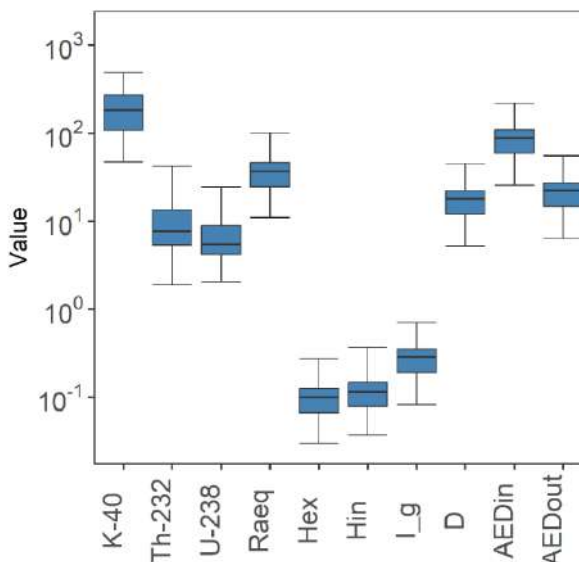


Рис. 29: точечная диаграмма иллюстрирует распределение естественных радионуклидов по всей стране на основе почвы и донных отложений изучаемых территорий.

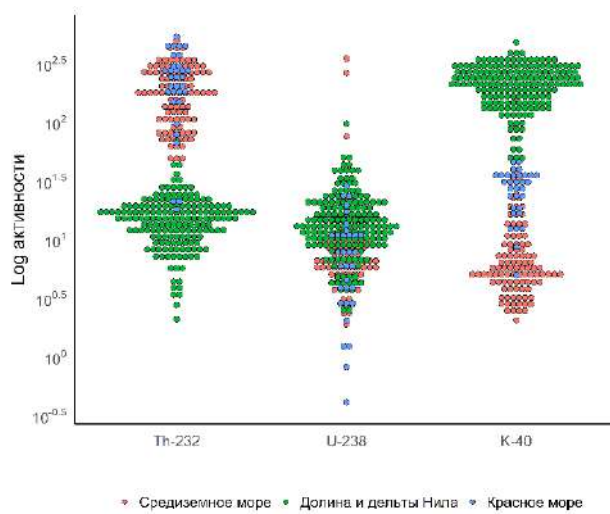
Эквидозиметрические риски

В этом разделе приведены результаты расчёта эквидозиметрического риска.

Рассчитанные риски на исследуемых

территориях Египта показывают, что радиационные риски (ELCR) от U-238, Th-232 и K-40 на всех исследуемых объектах близки между собой и значительно ниже среднего мирового допустимого уровня ($0,29 \times 10^{-3}$) (UNSCEAR, 2000; Abedin et al., 2020). Полученные результаты показывают, что рассчитанные радиационные риски от донных отложения, почвы, Средиземного и Красного морей $1,13 \times 10^{-4}$, $1,11 \times 10^{-4}$, $9,8 \times 10^{-5}$, и $1,2 \times 10^{-4}$, соответственно. В то время когда химиотоксикологические и эквидозиметрические риски более чем на три порядка перевешивают мировые допустимые уровни (10^{-6} – 10^{-4}) (Kurt-Karakus, 2012) и ($3,0 \times 10^{-4}$ – $1,9 \times 10^{-4}$) от каждого отдельного элемента при всех путях поступления, соответственно. Результаты расчёта химиотоксикологического риска (CR) от каждого хемотоксиканта варьируется от минимального значение $4,1 \times 10^{-6}$ до максимального значения $1,6 \times 10^{-1}$ от Zn в Красном море и от Co в Средиземном море со средним значением $3,9 \times 10^{-2}$.

Кроме того, показатель риска (HQ)– это суммарная величина всех рисков от хемотоксикантов для каждого отдельного объекта. Полученные



результаты показателя риска от донных отложения, почвы, Средиземного и Красного морей $3,2 \times 10^{-1}$, $3,1 \times 10^{-1}$, $2,6 \times 10^{-1}$, $2,1 \times 10^{-1}$, соответственно. Когда показатель риска больше единицы, существует вероятность возникновения канцерогенных эффектов, в то время как среднее значение показатель риска ниже 1 ($2,8 \times 10^{-1}$) не свидетельствует о значительном риске канцерогенных эффектов. На основании полученных результатов радиационного и химиотоксикологического риска, рассчитанные эквидозиметрические риски показывают, что наиболее превышение рассчитанных рисков наблюдаются в почвах и донных отложениях долины Нила и наименьше в прибрежных акваториях морей. Основная опасность для человека на исследуемых территориях исходит от химиотоксикантов. Вместе с тем, чтобы учесть совокупное влияние радиационного и химиотоксикологического рисков должна быть внедрена концепция эквидозиметрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные нами результаты вместе с литературными данными демонстрируют разнообразие содержания тяжёлых металлов и радионуклидов в изученных компонентах экосистем (почвы и донные отложения) в долине реки Нил и его Дельты, прибрежных районах Красного и Средиземного морей. Для выполнения данных задач использовался нейтронно-активационный анализ и связанные с ним аналитические методы. Помимо НАА, была также использована масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS. Результаты работы помогают прояснить многочисленные экологические проблемы Египта.

В ходе данной работы создана первая база данных по фоновым значениям содержания ТМ и ЕРН в почвах и донных отложениях Египта, которая, в свою очередь, помогает учёным из разных областей эффективно

использовать эти данные для изучения влияния изменения климата на качество почв и отложений, а также на морскую среду. Количество элементов в каждом объекте исследования варьируется. Например, в долине реки Нил и его Дельте общее количество элементов составило около 28, в Красном море около 43, и, наконец, в Средиземном море около 39 основных и микроэлементов. При проведении данной работы мы обнаружили наиболее загрязнённые места вдоль реки Нил и в его Дельте, а также вдоль прибрежных районов Египта в Красном и Средиземном морях. Внедрение ГИС-технологий позволило локализовать населённые пункты Египта, подвергшиеся сильному загрязнению.

Исследования показали, что уровень содержания в долине и Дельте реки Нил Br, Ti, Zr, Cr, V, Hf, Co, Ca, Zn, и Fe более высок по сравнению с литературными данными. На юго-востоке Египта значительна массовая доля урана, тория и редкоземельных элементов. Массовая доля Zr показала низкий уровень циркуляции или устойчивую добавку циркона, наводящую на мысль о нециклическом эффекте. Это может быть объяснено отсутствием нового дополнения качества накопления осадков с момента строительства Асуанской плотины, препятствующей поступлению наносов в долину реки Нил. Помимо этого, массовая доля U значительна на юге страны. Также можно утверждать, что элементы, содержащиеся в почвах, имеют происхождение от донных отложений, которые поступили с эфиопских высот, а в дельте Нил – также и из-за избыточного использования удобрений.

Высокие массовые доли (в порядке убывания Ca > Na > Br > Mg > Hf) были обнаружены в Красном море. Результаты содержания элементного состава показывают, что в донных отложениях прибрежной акватории Средиземного моря повешенными массовыми долями по сравнению с литературными данными характеризуется Cl, Sn, Zr, Hf, Ti, Cr, Ca, Na, Si, Sr,

Mg. В частности, большое количество Cr и Sn обнаружено вдоль побережья Средиземного моря на севере Египта (озера Эль-Буруллус, Эль-Манзала, Идку и Мариут). По сравнению с литературными данными, массовые доли этих элементов более значительны и соответственно представляют существенную опасность для человека.

На основании результатов данного исследования проводилась оценка потенциального экологического риска для человека и окружающей среды. Была проведена статистическая обработка массивов полученных данных для изучения вопроса происхождения элементов, их накопления и поведения. В том числе применялся метод главных компонент PCA и положительная матричная факторизация PMF. Результаты данной работы использовались для расчёта разных типов риска. Это дает лучшее понимание концепции и толкования термина эквидозиметрия как методологии учета суммирующих эффектов, вызванных сочетанным воздействием радионуклидов и токсичных элементов.

Значительный вклад Th-232 обнаружен в районах египетского побережья Средиземного моря и в некоторых местах вдоль побережья Красного моря. Вероятно повышенное количество Th-232 связано с наличием черного песка на северо-западе и добычей фосфатов на юго-востоке Египта. Точно так же было замечено, что содержание U-238 выше в реке Нил и его Дельте, чем в прибрежных районах морей. Эта особенность может быть объяснена физико-химическими свойствами глинистой почвы вокруг двух берегов реки и Дельты и избыточным использованием удобрений в сельскохозяйственных целях. Такое же объяснение можно дать повышенной концентрации K-40 в речных и дельтовых отложениях и почве.

Рассчитанные риски на исследуемых территориях Египта показывают, что радиационные риски на всех исследуемых объектах близки между собой

и значительно ниже среднего мирового допустимого уровня ($0,29 \times 10^{-3}$). Напротив, хемотоксикологические и эквидозиметрические риски более чем на три порядка превышают мировые допустимые уровни. Наибольшее превышение рассчитанных рисков наблюдается в почвах и донных отложениях долины Нила и наименьшее в прибрежных акваториях морей. Основная опасность для человека на исследуемых территориях исходит от хемотоксикантов. Вместе с тем, чтобы учесть совокупное влияние радиационного и химиотоксикологического рисков необходимо использовать концепцию эквидозиметрии.

ВЫВОДЫ

1. Впервые в ходе широкомасштабных комплексных экологических исследований наиболее густонаселённых и развитых территорий Египта в долине и Дельте реки Нил, побережий Красного и Средиземного морей в почвах и донных отложениях определён элементный состав хемотоксикантов и радионуклидов, созданы базы данных по их содержанию и определены их средние уровни «кларков» для этих территорий АРЕ. С помощью GIS-технологий построены цифровые карты пространственного распределения элементов, определены места с максимальными уровнями содержания и выявлены их источники.
2. Современные уровни содержания Br, Ti, Zr, Cr, V, Hf, Co, Ca, Zn, и Fe для долины реки Нил значительно превышают опубликованные ранее. По массовой доле урана, тория и редкоземельных элементов особенно выделяется юго-восток Египта, при этом содержание ТМ в почвах и донных отложениях почти одинаково. Очевидно, накопление в почвах исследуемых элементов, в основном, связано с их выветриванием и

оловым переносом на исследуемой территории и поступлением их с эфиопских высот, а также в результате разлива Нила до построения плотины.

3. Элементный состав донных отложений прибрежной акватории египетского сектора Красного моря характеризуется повышенными массовыми долями Ca, Na, Br, Mg, Hf и Cr, Sn вдоль побережья Средиземного моря на севере Египта (озера Эль-Ббуруллус, Эль-Манзала, Идку и Мариут). Это представляет значительную опасность для окружающей среды на этих территориях. Очевидно, загрязнение прибрежной акватории Красного моря связано с добычей фосфатов на юго-востоке Египта в районе Шарм-эль-Бахари, где отмечается максимальные концентрации этих элементов в донных отложениях и добычей урановых и золотоносных руд. Загрязнение прибрежной акватории Средиземного моря обусловлено красками, содержащими Cr и Sn и широко используемыми в портах египетского сектора во время ремонта кораблей.
4. Рассчитанные комплексные индексы загрязнения PLI и Zc для прибрежной акватории Средиземного моря близки к таковым, рассчитанным для Красного моря. Это свидетельствует о схожести экологической ситуации на этих территориях. Сравнение результатов визуализации PLI и Zc отложений ТМ позволяет признать, что PLI более точно выделяет места с повышенными индексами загрязнения и показывает на наличие источников загрязнения и потенциальной возможности возникновения экологических рисков, требующих особого внимания на этих территориях. В целом же можно

констатировать, что эти индексы отражают согласованную картину неоднородности загрязнения.

5. Рассчитанные коэффициенты обогащения элементов (EF) не в полной мере отражают экологическую ситуацию на исследуемых территориях. Наиболее адекватно картину экологического состояния отражают интегральные комплексные индексы загрязнения PLI и Zc, которые показывают, что картина не столь однозначна. По результатам расчетов значения комплексных индексов загрязнения исследуемых территорий по убыванию можно расположить в следующий ряд: долина и Дельта Реки Нил > прибрежные акватории Средиземного моря > прибрежные акватории Красного моря.
6. Полученные коэффициенты опасности от хемотоксикантов (HQ) для детей и взрослых показывают, что в первую очередь для человека на исследуемых территориях опасность представляют следующие элементы: Co, Cr, Ni, V и некоторые другие в зависимости от региона. Наиболее важен для взрослой категории населения пероральный путь их поступления. Среди исследуемых территорий по сравнению с прибрежными акваториями исследуемых морей выделяется долина и Дельта реки Нил.
7. Содержание естественных радионуклидов U-238, Th-232, и K-40 по территории исследований неодинаково. Наиболее высокая активность ЕРН выявлена в донных отложениях Средиземного моря, а затем Красного моря и минимальной в долине и Дельте реки Нил. В свою очередь в пределах этих регионов выделены зоны с относительно высоким содержанием K-40, U-238 и Th-232 в почвах и донных отложениях. Повышенное содержания K-40 в зонах долины Нила,

обусловлено гранулометрическим и минералогическим составом почв и донных отложений и избыточным внесением удобрений в этих локациях. Повышенное содержание U-238 и Th-232 в донных отложениях Красного и Средиземного морей связано с их переносом с юго-востока Египта, где ведется добыча урана и золота, а также, с наличием черного песка на северо-западе (Розетта) и добычей фосфатов на юго-востоке Египта.

8. Рассчитанные величины индексов радиационных рисков на этих территориях (H_{in} и H_{ex}) меньше единицы и не представляют опасности для человека и компонентов окружающей среды. Анализ результатов методом главных компонент показал, что основными дозобразующими ЕРН для человека являются U-238 и Th-232. А вклад K-40 в суммарную дозу минимален. Расчёт годовых эффективных доз (Зв) в помещении (AED_{in}) и на открытом воздухе (AED_{out}) показал, что в помещении она выше, чем на открытом воздухе.
9. Результаты расчетов показывают, что радиационные риски на всех исследованных объектах близки между собой и значительно ниже среднемирового допустимого уровня ($0,29 \times 10^{-3}$). Химитоксикологические и эквидозиметрические риски более чем на три порядка превышают мировые допустимые уровни. Наибольшее превышение рассчитанных рисков наблюдаются в почвах и донных отложениях долины Нила и наименьшее в прибрежных акваториях морей. Основная опасность для человека на исследуемых территориях исходит от хемотоксикантов. Вместе с тем, чтобы учесть совокупное влияние радиационного и хемотоксикологического рисков необходимо использовать концепцию эквидозиметрии.

СПИСОК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ЖУРНАЛАХ SCOPUS, WOS и RSCI

1. **Badawy** W.M., Mitwalli M., Dmitriev A.Y., Chepurchenko O., Saleh G., El-Farrash A., Bulavin M., Morsi T., Sallah M. Neutron activation analysis for geochemical characterization of rocks from gold mines in Egypt // *Applied Sciences*. 2023; 13(7): 4564. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13074564>. Scopus SJR (2022) 0,49; п.л. = 1,3, из них личный вклад (1,04) 80%.
2. **Badawy** W., Elsenbawy A., Dmitriev A., El Samman H., Shcheglov A., El-Gamal A., Kamel N.H.M., Mekewi M. Characterization of major and trace elements in coastal sediments along the Egyptian Mediterranean Sea // *Marine Pollution Bulletin*. 2022; 177:113526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113526>. Scopus SJR (2022) 1.490; п. л. = 2,22, из них л.в. (1,78) 80%.
3. **Badawy** W.M., Sarhan Y., Dului O.G., Kim J., Yushin N., Samman H.E., Hussein A.A., Frontasyeva M., Shcheglov A. Monitoring of air pollutants using plants and co-located soil-Egypt: characteristics, pollution, and toxicity impact // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(14):21049-21066. DOI: 10.1007/s11356-021-17218-7 Scopus SJR (2022) 0.94; п. л. = 2, из них л.в. (1,5) 75%.
4. **Badawy** W.M., Dului O., El-TaHER A., Elsenbawy A., Dmitriev A.Y., El-Gamal A., Arafa W. Datasets of trace elements in shallow marine sediments along the Egyptian shore of the Mediterranean and Red Seas // *Data in Brief*. 2022; 42:108217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108217>. Scopus SJR (2022) 0.26; п. л. =0,45, из них л.в. (0,36) 80%.
5. **Badawy** W.M., Dului O.G., El Samman H., El-TaHER A., Frontasyeva M.V. A review of major and trace elements in Nile River and Western Red Sea sediments: An approach of geochemistry, pollution, and associated hazards // *Applied radiation and isotopes*. 2021; 170:109595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109595>. Scopus SJR (2022) 0,42; п. л. = 2,09), из них л.в. (1.67) 80%.
6. **Badawy** W., Frontasyeva M.V., Ibrahim M. Vertical Distribution of Major and Trace Elements in a Soil Profile from the Nile Delta, Egypt // *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2020;27(2):281-294. DOI: <https://doi.org/10.2478/eces-2020-0018>. Scopus SJR (2022) 0,36; п. л. = 1,06), из них л.в. (0,901) 85%.
7. **Badawy** W.M., Dului O.G., Frontasyeva M.V., El-Samman H., Mamikhin S.V. Dataset of elemental compositions and pollution indices of soil and sediments: Nile River and delta –Egypt // *Data in Brief*. 2020; 28:105009.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105009>. Scopus SJR (2022) 0,26; п. л. = 0,84), из них л.в. (0,672) 80%.
8. El-Taher A., **Badawy** W.M., Khater A.E.M., Madkour H.A. Distribution patterns of natural radionuclides and rare earth elements in marine sediments from the Red Sea, Egypt. *Applied radiation and isotopes* // 2019; 151:171-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.06.001>. Scopus SJR (2022) 0,42; п. л. = 1,51, из них л.в. (1,13) 75%.
 9. **Badawy** W.M., El-Taher A., Frontasyeva M.V., Madkour H.A., Khater A.E.M. Assessment of anthropogenic and geogenic impacts on marine sediments along the coastal areas of Egyptian Red Sea // *Applied radiation and isotopes* 2018; 140:314-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.07.034>. Scopus SJR (2022) 0,42; п. л. = 1,85, из них л.в. (1,48) 80%.
 10. **Badawy** W.M., Dului O.G., Frontasyeva M.V., El Samman H., Faanhof A. Environmental radioactivity of soils and sediments: Egyptian sector of the Nile valley // *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 2018;54(5):535-547. DOI: <https://doi.org/10.1080/10256016.2018.1482292>. Scopus SJR (2022) 0,48; п. л. = 1,05, из них л.в. (0,89) 85%.
 11. **Badawy** W.M., Ghanim E.H., Dului O.G., El Samman H., Frontasyeva M.V. Major and trace element distribution in soil and sediments from the Egyptian central Nile Valley // *Journal of African earth sciences*. 2017; 131:53-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.03.029>. Scopus SJR (2022) 0,59; п. л. = 1,22, из них л.в. (0,73) 60%.
 12. Okasha A., Atta D., **Badawy** W., Frontasyeva M., Elhaes H., Ibrahim M. Modeling the Coordination Between Na, Mg, Ca, Fe, Ni, and Zn with Organic Acids // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2017;14(3):1357-1361. DOI: 10.1166/jctn.2017.6457. Scopus SJR (2022) 0,15; п. л. = 0,66, из них л.в. (0,33) 50%.
 13. **Badawy** W., Cherpurchenko O.Y., El Samman H., Frontasyeva M.V. Assessment of Industrial Contamination of Agricultural Soil Adjacent to Sadat City, Egypt // *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2016;23(2):297-310. DOI: <https://doi.org/10.1515/eces-2016-0021>. Scopus SJR (2022) 0,23; п. л. = 1,06, из них л.в. (0,79) 75%.
 14. Harb S., Ahmed N., **Badawy** W., Saad N. Estimation of Radioecological Parameters of Soil Samples from a Phosphatic Area // *Nuclear Technology and Radiation Protection*. 2016;31(2):165-172. DOI: <https://doi.org/10.2298/Ntrp1602165h>. Scopus SJR (2022) 0,29; п. л. = 0,89, из них л.в. (0,623) 70%.
 15. **Badawy** W.M., Ali K., El-Samman H.M., Frontasyeva M.V., Gundorina S.F., Dului O.G. Instrumental neutron activation analysis of soil and

sediment samples from Siwa Oasis, Egypt // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2015;12(4):637-644. DOI: <https://doi.org/10.1134/S154747711504007X>. Scopus SJR (2022) 0,27; п. л. = 0,91, из них л.в. (0,16) 60%.

16. Arafa W.M., **Badawy** W.M., Fahmi N.M., Ali K., Gad M.S., Dului O.G., Frontasyeva M.V., Steinnes E. Geochemistry of sediments and surface soils from the Nile Delta and lower Nile valley studied by epithermal neutron activation analysis // *Journal of African earth sciences*. 2015; 107:57-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.04.004>. Scopus SJR (2022) 0,59; п. л. = 1,11, из них л.в. (0,72) 65%.

Можно познакомиться с полным списком статей на сайте автора в ИСТИНА по ссылке (<https://istina.msu.ru/profile/Wael/>).