

ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ — ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ



НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (8) 2023





ТРАЕКТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ – ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА, ТЕХНОЛОГИИ

№ 4 (8) 2023

Главный редактор

Ярмошенко Илья Владимирович, к. ф.-м. н., директор Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Заместитель главного редактора

Васильев Алексей Владимирович, к. т. н., заведующий лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Редакционная коллегия

Вараксин Анатолий Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Веселкин Денис Васильевич, д. б. н., заведующий лабораторией Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Екатеринбург)

Екидин Алексей Акимович, к. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Захаров Вячеслав Иосифович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий лабораторией Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Иванов Владимир Юрьевич, к. ф.-м. н., директор института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург)

Крышев Александр Иванович, д. б. н., заведующий лабораторией Научно-производственного объединения «Тайфун» Росгидромета (г. Обнинск)

Марков Дмитрий Владимирович, д. т. н., директор АО «НИИТФА» (г. Москва)

Микляев Петр Сергеевич, д. г.-м. н., профессор РАН, главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (г. Москва)

Сюрдо Александр Иванович, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург)

Талалай Александр Григорьевич, д. г.-м. н., профессор, заведующий кафедрой Уральского государственного горного университета (г. Екатеринбург)

Тузанкина Ирина Александровна, заслуженный деятель науки РФ, д. м. н., профессор, Институт иммунологии и физиологии УрО РАН (г. Екатеринбург)

Юрков Анатолий Константинович, к. г.-м. н., заведующий лабораторией Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (г. Екатеринбург)



СОДЕРЖАНИЕ

Крупномасштабная чистая энерготехнология будущего Н. В. Горин В. П. Кучинов, В. В. Шидловский, А. В. Моисеев	2
Решение проблемы перевода ядерного реактора в подкритический режим методом марковской цепи Н. Н. Ошканов, Г. Е. Ваулин, М. А. Метельникова	12
Подходы к статистическому моделированию медико-биологических данных на примере оценки фактического питания подростков Е. Д. Константинова, Т. А. Маслакова, А. Н. Вараксин, С. С. Делец	19
Радоновое обследование Белоярской АЭС Д. Д. Десятов, А. Д. Онищенко, А. В. Васильев, А. В. Климшин, В. О. Никитенко, А. Е. Самбуров, М. В. Жуковский	30
История науки о проблеме антропоцена и деконструкции природы Ю. С. Шипицына	37
Строительные материалы в поверхностном осадке урбанизированных территорий Е. О. Илгашева	44
Непараметрический рандомизационный тест: идея, алгоритм, преимущества, недостатки и пример применения А. П. Сергеев, А. С. Буторова, Е. А. Корюкин, В. С. Бобаков, С. В. Павлова	54
Исследование смертности детей от онкологических заболеваний на территориях Челябинской области, подвергшихся радиоактивному и химическому загрязнению методами математической статистики. А. А. Живодеров, Л. Г. Коньшина	68

**ТРАЕКТОРИЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ –
ЧЕЛОВЕК, ПРИРОДА,
ТЕХНОЛОГИИ**

№ 4 (8) 2023

Главный редактор:
И. В. Ярмошенко

Редактор:
М. Э. Чупрякова

Компьютерная верстка:
Д. Д. Десятов

Дизайн обложки:
А. В. Вожаков

Автор фото:
А. В. Вожаков

Адрес редакции:
620990, г. Екатеринбург,
ИПЭ УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 20
Тел.: (343) 374-37-71
E-mail: iie@ecko.uran.ru
www.restrajjectory.ru

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой
по надзору в сфере связи,
информационных
технологий и массовых
коммуникаций
27 апреля 2022 г.,
Эл№ ФС77-83207

Учредитель
ИПЭ УрО РАН

Перепечатка материалов,
опубликованных в журнале,
возможна только с
разрешения редакции.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ ЧИСТАЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯ БУДУЩЕГОН. В. Горин ¹, В. П. Кучинов ², В. В. Шидловский ³, А. В. Моисеев ⁴¹ ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия² НИЯУ МИФИ, Москва, Россия³ АО «Прорыв», Москва, Россия⁴ АО «НИКИЭТ им. Н. А. Доллежала», Москва, Россия

Отмечается, что любая технология, преобразующая энергию первичных источников в тепло, механическое движение или электричество, за время своего жизненного цикла неизбежно производит отходы и загрязняет окружающую среду. В течение ближайшего столетия неизбежно придется изменять существующую структуру энергетики, уменьшать долю действующих углеводородных энерготехнологий и увеличивать долю чистых. Условия, которым они должны удовлетворять, просты и соответствуют общечеловеческим ценностям, но пока ни одна из существующих энерготехнологий полностью им не удовлетворяет. Ожидается, что всем условиям удовлетворит крупномасштабная атомная энергетика на основе реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом, которые пока находятся в стадии отработки. Для такого перехода потребуются политическая воля, инвестиции и поддержка населения. Отмечается, что атомная энергетика пока не пользуется поддержкой населения, сложившиеся фобии и стереотипы возникают быстро, живут долго, изменяются медленно, население продолжает связывать с атомной энергетикой возможности аварий с радиоактивным загрязнением. Для изменения такого отношения предлагается проводить непрерывную информационно-разъяснительную работу с разными группами населения, а для воспитания молодого поколения с новым отношением к атомной энергетике ввести специализированный курс в школьные и вузовские учебные программы. Предлагается привлечь к решению проблемы перехода к крупномасштабной атомной энергетике энергетические корпорации, которые могут начать финансирование работ, прогнозируя возможные предпочтения в средне- и долгосрочной перспективе. Сделан вывод, что атомная энергетика, производящая на единицу массы сырья на несколько порядков больше энергии и меньше отходов относительно традиционной углеводородной, будет крупномасштабной чистой энерготехнологией будущего, но ее широкое использование потребует воли политиков, инвестиций и поддержки населения.

Ключевые слова: крупномасштабная энерготехнология; стереотипы и фобии; реакторы на быстрых нейтронах; замкнутый ядерный топливный цикл; объемы потребляемого сырья; объемы образующихся отходов.

1. Введение

Любая технология, преобразующая энергию первичных источников в тепло, механическое движение или электричество, в течение своего жизненного цикла неизбежно производит отходы и загрязняет окружающую среду. Абсолютно чистых энерготехнологий, не влияющих на окружающую среду и условия жизни населения, не существует. Словосочетания «чистая энерготехнология» в названии статьи и «биосферно совместимая энерготехнология» в тексте подразумевают лучшую из существующих технологий, которая способна стать основой крупномасштабной энергетики будущего, одной или в сочетании с другими [1].

Современные энергетические технологии основаны в большинстве своем на сжигании угля, нефти и газа. Методы утилизации образующихся отходов всегда были традиционны – газообразные выбрасывались в атмосферу, жидкие сливались в водоемы в расчете на то, что они распределятся в больших объемах воздуха или

воды, их концентрации существенно уменьшатся и не окажут влияния на окружающую среду. Методы были приемлемы и работоспособны до тех пор, пока население планеты не превышало 1 млрд чел., выброс CO_2 в атмосферу был малым и природа справлялась с его утилизацией.

В настоящее время объем отходов от техногенной деятельности существенно увеличился и начал приходить в противоречия с возможностью среды по их утилизации, что обуславливает основные вызовы современности – загрязнение окружающей среды и, возможно, глобальное потепление. Противоречия нарастают быстро, запас времени у цивилизации, скорее всего, ограничен временем жизни двух-трех поколений людей, промедление в их решении может иметь достаточно серьезные последствия, показанные полвека назад в работах Римского клуба [2, 3].

Прогнозируемые запасы углеводородного сырья (нефти и газа) даже при их текущем потреблении будут в основном исчерпаны в течение ближайшего столетия [4]. Запасы угля существенно больше, но его применение в масштабах, компенсирующих исчерпание нефти и газа, может привести к экологической катастрофе, что недопустимо. Поэтому в течение ближайшего столетия неизбежно придется менять существующую структуру энергетики, уменьшать долю действующих углеводородных энерготехнологий и увеличивать долю чистых. В противном случае становится сомнительным не только устойчивое развитие цивилизации, но и ее существование с численностью ~8–10 млрд чел.

2. Роль парниковых газов в глобальном потеплении

Технология выброса газообразных отходов в атмосферу, а никакой другой у цивилизации пока нет, привела к тому, что по мере роста численности населения и опережающего роста производства энергии и материальных благ нарастал совокупный выброс CO_2 в атмосферу. Так, с 1850 по 2019 г. выброс составил $2\,400 \pm 240$ Гт, из которых более половины (58 %) произошло с 1850 по 1989 г., а около 42 % – в период с 1990 по 2019 г. [5]. Самое тревожное то, что ограничений и снижений выбросов пока не ожидается.

Масса атмосферы $5 \cdot 10^6$ Гт, при концентрации CO_2 300 ppm его исходное количество в атмосфере 1 500 Гт. Таким образом, за последние 170 лет, а это незначительный срок в глобальных процессах планеты, произошел залповый выброс CO_2 , количество которого в 1,5 раза превышало его содержание в атмосфере, причем 42 % выброса реализовалось за последние 30 лет. За последние ~60 лет суша и океан поглотили около половины выброшенного газа (~56 % в год). Непоглощенный газ увеличил свою концентрацию в атмосфере, начиная от 290 ppm (1850 г.) до 410 ppm (2019 г.), т. е. возможности природы по утилизации отходов оказались ограничены. Происходит накопление парниковых газов в атмосфере, на рис. 1 показана экспериментальная зависимость глобальной приземной температуры от кумулятивных выбросов углекислого газа с экстраполяцией по разным сценариям (заимствовано из [6] с минимальным редактированием).

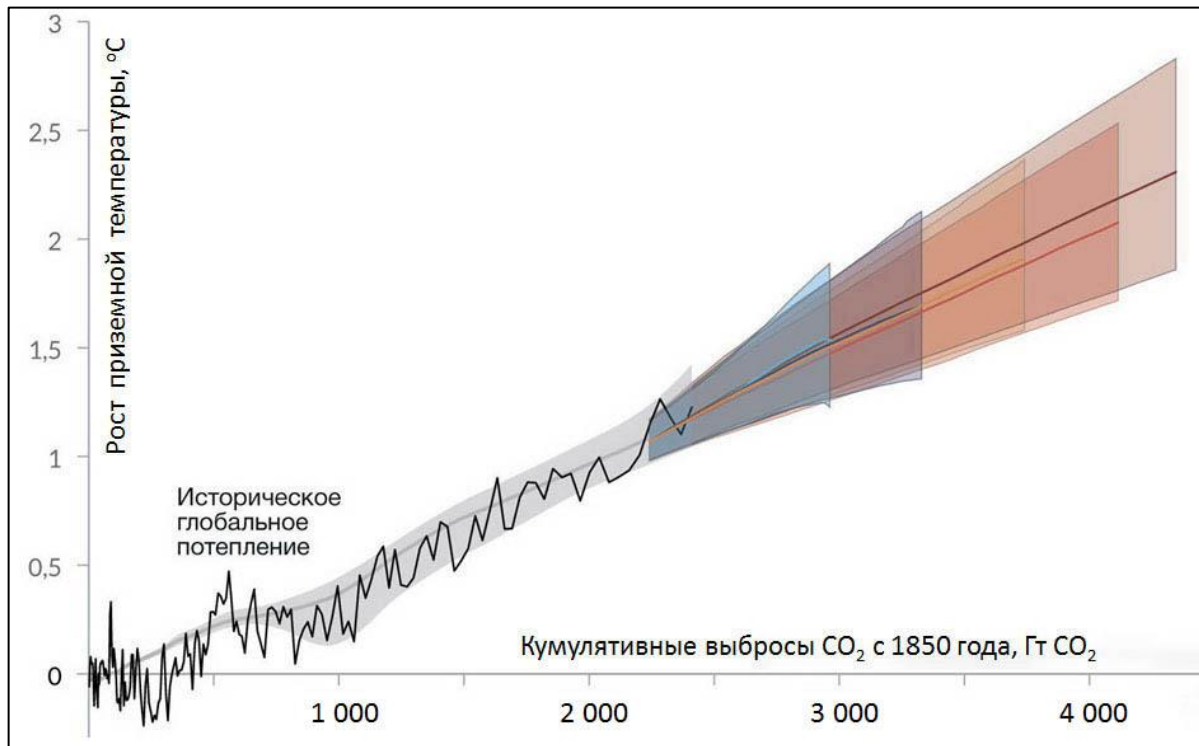


Рис. 1. Рост приземной температуры в зависимости от кумулятивных выбросов CO_2

Зависимость линейна, и можно прогнозировать, что при сохранении сложившейся интенсивности выбросов к 2050...2070 гг. рост глобальной приземной температуры достигнет двух градусов с соответствующими неблагоприятными климатическими изменениями. Возможность замедления ее роста будет зависеть от загрязнения атмосферы основными загрязнителями – объектами углеводородной энергетики, т. е. решение проблем с выбросами CO_2 становится весьма актуальным [7].

Объем отходов от производства энергии дополняется отходами от добычи углеводородных энергоносителей. Так, в 2017 г. на территории Российской Федерации, по данным Росприроднадзора, образовалось 6 220,6 млн т отходов [8]. Наибольшее количество отходов в 2017 г. отмечено в Сибирском федеральном округе – 4 417,6 млн т, или 71 % от общего количества по стране. Столь значительные объемы связаны с добычей угля в Кемеровской области, основном угледобывающем регионе Российской Федерации, и образованием большого количества вскрышных пород, которые являются отходом V класса опасности.

3. Энергоноситель

Современная структура мировой энергетики основывается на сжигании углеводородного сырья, за счет чего производится ~80 % энергии, но его запасы ограничены (рис. 2).

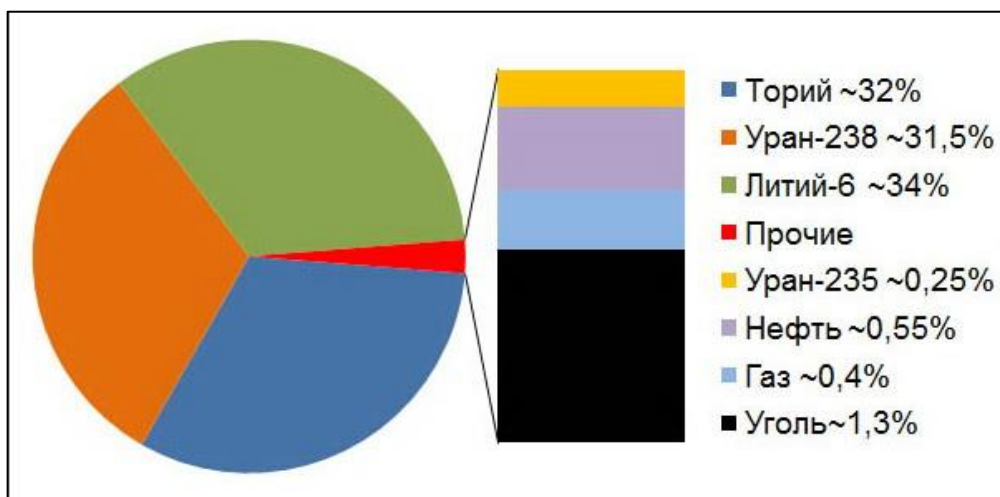


Рис. 2. Мировое распределение энергетических ресурсов [9]

В разных литературных источниках имеется большой разброс данных по запасам/ресурсам тория и лития, но тем не менее доля углеводородов и относительно дешевого урана-235 в энергетическом балансе мала и не превышает единиц процентов, поэтому снижение доли углеводородов придется компенсировать ядерным энергоносителем, т. е. переходить на атомную энергетику. Это позволит на единицу массы сырья на несколько порядков увеличить производство энергии и уменьшить массу отходов. Действительно, в единичном акте получения энергии при сгорании углеводородного топлива происходит химическая реакция $C+O_2 \rightarrow CO_2+4,2 \text{ эВ}$. В реакторе происходит ядерная реакция $U, Pu + n \rightarrow 2 \text{ осколка} + 200 \text{ МэВ}$ и выделяется на 7 порядков больше энергии.

Заманчиво было бы вообще отказаться от энергоносителей (в привычном смысле этого слова) и использовать возобновляемые источники энергии, которыми человек веками пользовался, – солнечным теплом, силой ветра и воды. Однако ресурсы гидроэнергетики уже практически исчерпаны, а П. Л. Капица полвека назад показал, что солнечная и ветровая энергетика не сможет решить крупномасштабные энергетические проблемы из-за малой плотности потока энергии [10]. Однако для решения бытовых вопросов, требующих меньших масштабов энергии, их использование оправдано.

4. Требования к крупномасштабной чистой энерготехнологии

Основные требования к крупномасштабной чистой энерготехнологии – ее безопасность, конкурентоспособность и, естественно, биосферная совместимость, причем термин «безопасность» подразумевает ресурсную, эксплуатационную и утилизационную безопасность [11].

В этот перечень можно было бы подключить и «энергетическую безопасность», которую много обсуждают в последнее время. При этом ее обеспечение видят в диверсификации энергоносителей, забывая при этом о надежности производства энергии самими энергосистемами.

Как известно, сегодня при обсуждении вопроса перехода на чистую энергетику основной упор делается на расширение использования солнечной и ветровой энергетики, которая весьма зависима от наличия ветра и солнца. Также предполагается продолжение использования углеводородной энергетики с использованием систем улавливания и хранения углерода. В отношении же более широкого использования атомной энергетики, зарекомендовавшей себя в качестве надежного источника энергии, можно наблюдать весьма широкий разброс мнений – от полного ее отрицания до использования в качестве поддержки ветровой и

солнечной энергетики с использованием реакторов средней и малой мощности [12–14].

В то же время те преобразования в энергетическом секторе, которые необходимо будет осуществить для перехода к крупномасштабной чистой энергетике, носят фундаментальный характер и потребуют от руководителей государств, политиков и населения не только понимания, но непосредственного осуществления преобразований.

В этой связи важно понимать условия, которым такая энергетика должна удовлетворять. Они достаточно просты, соответствуют общечеловеческим проблемам, если не замыкаться на национальных интересах какой-либо одной страны.

Крупномасштабная чистая энергетика должна:

1. Обладать лучшей биосферной совместимостью из доступных энерготехнологий и оказывать минимальное влияние на условия жизни населения в процессе производства энергии. Неизбежные радиоактивные отходы атомной энергетики будут представлять потенциальную опасность для населения, но они надежно изолируются. Отходы угольной, нефтяной и газовой промышленности опасны для окружающей среды и населения, но не изолируются.

2. Производить не менее $\sim 3\text{--}5 \cdot 10^{20}$ Дж/год. В настоящее время современная энергетика производит 14,3 млрд т. н. э. энергии ($6 \cdot 10^{20}$ Дж/год) [15].

3. Последствия любой техногенной аварии, неизбежной на любом производстве, не должны выходить за пределы производственной площадки.

4. Процесс получения энергии не должен сопровождаться выбросами вредных веществ или, по крайней мере, их должно быть мало, или они должны быть надежно локализованы как при штатной работе, так и при аварийных ситуациях.

5. Локализуемые отходы не должны быть физически и химически более активны, чем исходное топливное сырье.

6. Не зависеть от неопределенностей с обеспечением топливным сырьем как минимум на ближайшие сотни лет.

Ни одна из существующих энерготехнологий полностью этим требованиям пока не удовлетворяет. Первому из перечисленных требований удовлетворяет атомная энергетика и технологии на возобновляемых источниках – солнечная, ветровая, гидроэнергетика, приливная, геотермальная. Однако выработкой электроэнергии солнечными и ветровыми технологиями и передачей ее в сеть трудно управлять. Второму условию удовлетворяет только существующая атомная энергетика с тепловыми реакторами и открытым топливным циклом, а остальным – сможет удовлетворить создаваемая технология с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым топливным циклом.

5. Особенности перехода к крупномасштабной атомной энергетике

Реализация полного перехода к новой крупномасштабной энергетике с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом в течение текущего столетия представляется сложной задачей. В настоящее время производимая в мире энергия с помощью атомной энерготехнологии составляет $\sim 5\%$, а в производстве электроэнергии $\sim 10\%$. Для решения экологических проблем ее необходимо будет кратно увеличить, например, до $\sim 50\text{--}70\%$, понимая, что остальные потребности в энергии будут обеспечиваться гидроэнергетикой, солнечной и ветровой и за счет экологически безопасного сжигания биотоплива.

Для такого перехода потребуются концентрации значительных финансовых ресурсов и производительных сил, которые есть в распоряжении современной цивилизации [16]. Действительно, мировые инвестиции в развитие возобновляемых источников энергии измеряются сотнями миллиардов долларов, а в атомную – менее десяти. Однако надеяться на возобновляемые источники энергии довольно рискованно, что подтвердилось энергетической ситуацией в Европе в 2022 г. Тем не

менее развитие возобновляемых источников энергии следует продолжать, они будут использоваться там, где не требуются большие базовые мощности. Основой же новой энергетики должна стать крупномасштабная атомная энергетика с использованием реакторов на быстрых нейтронах с замыканием ядерного топливного цикла.

Потребность в значительных инвестициях и трудности на пути перехода к такой энергетической технологии не должны смущать политиков в достижении поставленной цели. Так, в прошлом веке Франция запускала ежегодно по 6–8 реакторов, в настоящее время примерно столько же строит Китай. Страны с наибольшей долей электроэнергии, производимой на АЭС, – Франция (69 %), Словакия (52 %), Бельгия (47 %). В настоящее время Белорусская АЭС производит ~30 % электроэнергии в стране, а с вводом второго энергоблока эта доля удвоится. Российские АЭС производят 19,9 % электроэнергии в стране.

6. Поддержка атомной энергетики обществом

Кроме инвестиций, существует еще одна проблема – отношение населения к атомной энергетике со сложившимися у него фобиями и стереотипами, с опасениями аварий типа чернобыльской или Фукусимы, с опасениями радиоактивного загрязнения местности, влиянием на здоровье и пр. Население активно не протестует, но и не поддерживает развитие ядерных технологий, у него нет востребованного отношения к развитию атомной энергетики [17, 18]. Изменить это отношение можно непрерывной информационно-разъяснительной работой с разными группами населения, понимая, что это достаточно долгий процесс. Более эффективно и быстро результат может быть достигнут при введении соответствующих учебных дисциплин в школьные и вузовские программы, в результате чего через 5–10 лет в жизнь вступит полноправное молодое поколение с новым отношением к атомной энергетике [19–21].

Одновременно, как представляется, целесообразно привлекать к решению проблемы перехода к крупномасштабной атомной энергетике энергетические корпорации, которые могут начать финансирование работ в интересах предстоящих выгод в средне- и долгосрочной перспективе. Такая работа за рубежом активно проводится. Как правило, руководство таких корпораций полностью владеет основной информацией, убеждено в безопасности атомных энерготехнологий и соблюдении режима ядерного нераспространения [22–24]. Они могут прогнозировать появление законодательно принятых преференций, а возможно, смогут инициировать их сами для крупномасштабных чистых энерготехнологий, включая атомную энергетiku. Преференции могут быть значительными, т. к. от чистой энерготехнологии будет зависеть не только устойчивое развитие цивилизации, но даже ее существование, и в этой связи можно предположить, что крупные энергетические корпорации могут начать финансирование работ, не дожидаясь поддержки и востребованного отношения населения.

7. Заключение

1. В настоящее время окружающая среда уже не справляется с утилизацией отходов, образующихся от техногенной деятельности современной цивилизации, насчитывающей около 8 млрд человек. Так, в частности, в атмосфере накапливаются газообразные отходы от сжигания углеводородных энергоносителей и, возможно, тем самым они инициируют глобальное потепление.

2. Необходима замена традиционной углеводородной энергетики, основанной на сжигании угля, нефти и газа, на чистую, способную на единицу сырья производить на несколько порядков больше энергии и меньше отходов. Такой крупномасштабной энергетикой может быть атомная с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом.

3. Для перехода на новую энергетическую платформу необходимо решение политиков, а также инвестиции и формирование у населения востребованного отношения к атомной энергетике. Наиболее эффективно это может быть достигнуто при введении специализированных учебных дисциплин в школьные и вузовские программы.

4. Представляется целесообразным привлекать к решению проблемы перехода к крупномасштабной атомной энергетике крупные энергетические корпорации, которые могут начать финансирование работ в интересах предстоящих выгод в средне- и долгосрочной перспективе.

8. Список литературы

1. Биосферная совместимость быстрых реакторов с замкнутым ядерным топливным циклом / Н. В. Горин, В. П. Кучинов, В. М. Декусар, В. В. Шидловский // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – Вып. 2(6). – С. 28–38.
2. Пределы роста / Д. Медоуз, Д. Медоуз, Й. Рандерс, В. Беренс III. – М. : МГУ, 1991.
3. Медоуз, Д. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Медоуз. – М. : ТКЦ Академкнига, 2007. – 496 с.
4. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общей ред. проф. Е. О. Адамова. – М. : НИКИЭТ, 2020.
5. МГЭИК, 2023 г.: Резюме для политиков. Изменение климата 2023: Обобщающий отчет. Доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Вклад рабочих групп I, II и III в Шестой оценочный отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата [Основная группа авторов, Х. Ли и Дж. Ромеро (ред.)] // МГЭИК, Женева, Швейцария, 36 с.
6. Изменение климата, 2021 год. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Резюме для политиков // МГЭИК. 2021. Швейцария.
7. 2022 Intergovernmental Panel on Climate Change. Electronic copies of this Summary for Policymakers are available from the IPCC website www.ipcc.ch
8. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». – М. : Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. – 888 с.
9. Быстрый реактор с высокой избыточной наработкой делящихся нуклидов в двухкомпонентной ядерной энергетике с U-Pu и Th-U-Pu топливным циклом / П. Н. Алексеев, Е. А. Андрианова, В. Ю. Бландинский [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2020. – вып. 5. – С. 53–65.
10. Капица, П. Л. Энергия и физика: Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии наук СССР, Москва, 8 октября 1975 г. // Вестник АН СССР. – 1976. – № 1. – С. 34–43. – URL: http://vivovoco.astronet.ru/VV/PAPERS/KAPITZA/KAP_10.HTM (дата обращения: 13.01.2021).
11. Белая книга ядерной энергетики / Е. О. Адамов, Л. А. Большов, И. Х. Ганев [и др.] М. : ГУП НИКИЭТ, 2001.
12. Nuclear energy – The solution to climate change? / N. Muellner, N. Arnold, K. Gufler [et al.] // Energy Policy. 155 (2021), 1–10.
13. Kaplienko, A. 2023. Renewable energy sources: is it a panacea for global electricity generation or not? / A. Kaplienko, B. Gabaraev // Obozrevatel/Observer. 3 (2023). – 27–36.
14. Pershukov, V. Paving the Way to Green Status for Nuclear Power / V. Pershukov, V. Artisyuk, A. Kashirsky // Sustainability. – 2022. – 14. – 9339. – URL: <https://doi.org/10.3390/su14159339>. [Электронный ресурс]: <file:///C:/Users/User/Downloads/sustainability-14-09339-v2-2.pdf> (дата обращения: 21.05.23).
15. Global Energy and CO₂ Status Report 2018 // International Energy Agency [Электронный ресурс]. – URL: https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf (дата обращения: 05.02.2021).
16. Харитонов, В. В. Сценарии развития мировой ядерной энергетики / В. В. Харитонов // Атомный эксперт. – 2019. – № 1. С. 47–53.
17. Харви, Ш. Стимулирование интереса молодежи к ядерной энергетике / Ш. Харви // Бюллетень МАГАТЭ. – Март. – 2021. – С. 20–21.

18. Бильбао-и-Леон, С. Как заставить мир посмотреть на ядерную отрасль под другим углом / С. Бильбао-и-Леон // Бюллетень МАГАТЭ. – Март. – 2021. – С. 28–29.
19. Горин, Н. В. Аргументы для разных категорий населения в интересах формирования поддержки развития атомной энергетики / Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, Б. К. Водолага // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2023 по направлению «Инновационные ядерные технологии»: сб. науч. тр. всерос. науч.-практ. конф. 31 января – 2 февраля 2023 г. – М.: НИЯУ МИФИ; Снежинск: СФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – 149 с. – С. 24–28. – URL: https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2023/04/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B_2023.pdf (дата обращения: 21.05.23).
20. Воспитание у населения востребованного отношения к атомной энергетике Н. В. Горин, Н. Л. Абрамова, С. В. Нечаева, О. С. Головихина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2021. – № 87. – С. 7–18. – DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18
21. Атомная энергетика как основа устойчивого развития / Н. В. Горин, Б. К. Водолага, В. П. Кучинов, В. В. Шидловский // Государственное управление. Электронный вестник. – 2022. – № 95. – С. 7–19. – DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-7-19.
22. Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортёром быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ / Н. В. Горин, А. Л. Карманов, В. Н. Первиненко [и др.] // Атомная энергия, 2021. – Т.131. – Вып. 4. – С. 227–232.
23. Барьеры на путях ядерного распространения при экспорте российских быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (на примере БРЕСТ ОД-300) / Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, В. П. Кучинов [и др.] // Вестник НЯЦ. – 2021. – Вып. 4(88). – С. 16–21. – URL: <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21> (дата обращения:).
24. Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т.130. – Вып. 1. – С. 48–51.

Сведения об авторах:

Горин Николай Владимирович, к. ф.-м. н., в. н. с. ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ имени академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия. Эл. почта: n.gorin@vniitf.ru

Кучинов Владимир Петрович, доцент НИЯУ МИФИ, Москва, Россия.

Шидловский Владимир Владиславович, к. т. н., руководитель управления АО «Прорыв», Москва, Россия.

Моисеев Андрей Владимирович, к. ф.-м. н., научный руководитель проекта БРЕСТ-ОД-300, научный руководитель проекта БРЕСТ-ОД-300, Москва, Россия.

FUTURE LARGE-SCALE “CLEAN” ENERGY TECHNOLOGY

N. V. Gorin ¹, V. P. Kuchinov ², V. V. Shidlovsky ³, A. V. Moiseev ⁴

¹FSUE RFNC - VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin, 13 Vasilyev Str., 456770 Snezhinsk, Chelyabinsk Reg., Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, 31, Kashirskoe shosse, 115409, Moscow

³JSC «Proryv», 2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

⁴NIKIET JSC, 2/8 Malaya Krasnoselskaya Str., 107140 Moscow, Russia

It is emphasized that any technology transforming primary source energy into heat, mechanical motion or electricity inevitably results in waste production and contamination of the environment during its lifecycle. In the next century the current energetic structure will inevitably have to be changed in terms of decreasing the fraction of the present fossil fuel energy technologies and increasing the fraction of the “clean” ones. These technologies must fulfil conditions that are simple and consistent with universal human values but so far none of the present energy technologies fully satisfies them. Large-scale nuclear power based on the closed-cycle fast neutrons reactors under development would satisfy all of these conditions. Political willpower, investments, and public approval are needed to make such transition. It is noted that nuclear power is not yet supported by people; engrained phobias and stereotypes arise quickly, live long and change slowly so in the people’s mind nuclear power industry is still associated with radioactive contamination accidents. Sustained public awareness efforts with different groups of people are proposed in terms of changing this attitude; a special course is suggested to be included in the school and academic programs to educate young generation with new attitude to the nuclear power industry. The problem of transition to the large-scale nuclear power industry is proposed to be solved with participation of the energy corporations that can start to finance activities and predict potential preferences in the mid- and long-term periods. Therefore, it may be concluded that the nuclear power industry producing several orders of magnitude more energy/less waste per unit mass of material as compared with the traditional fossil fuel industries will be a large-scale “clean” energy technology. However, without political willpower, investments, and public approval its wide usage is almost unrealistic.

Key words: large-scale energy technology; phobias and stereotypes; fast-neutron reactors; closed fuel cycle; volumes of consumed raw materials; volumes of produced waste.

References

1. Biosphere compatibility of fast reactors with a closed nuclear fuel cycle / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, V. M. Dekusar, V. V. Shidlovsky // Research Trajectory – Human, Nature, Technology. – 2023. – № 2 (6). – pp. 28–38.
2. Meadows, D. Limits to Growth / D. Meadows, D. Meadows, J. Randers, B. Bererns III. – M: MSU, 1991.
3. Limits to Growth. The 30-Year Update / D. Meadows, J. Randers, D. Meadows – M : Akademkniga Publ., 2007.
4. Adamov, E. O. General Editor: Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors: White Book of Russian Nuclear Power (Handbook of Russian Nuclear Power). August 7, 2022 / Academic Press <https://www.amazon.com/Closed-Nuclear-Fuel-Cycle-Reactors/dp/0323993087?asin=0323993087&revisionId=&format=4&depth=1> (accessed 21.05.2023).
5. IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages.
6. Climate Change 2020: Synthesis Report. Summary for Policymakers. 2021. IPCC, Geneva,

- Switzerland.
7. 2022 Intergovernmental Panel on Climate Change. Electronic copies of this Summary for Policymakers are available from the IPCC website www.ipcc.ch
 8. State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2017". Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; NPP "Cadastre", 2018. 888 p.
 9. Fast Reactor with High Excess Production of Fissile Nuclides in Two-Component Nuclear Power Engineering with U-PU and TH-U-PU Fuel Cycle / Alekseev P.N., Andrianova E.A., Blandinsky V.YU. [et al.] // Problems of Nuclear Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors". 2020. issue 5. P. 53-65.
 10. Kapica, P. L. Energy and Physics. // Report to the scientific session on the 250-th Anniversary of the USSR Academy of Sciences. Moscow. 08.10.75.
 11. Adamov E.O. et al. White Book of Nuclear energy // «NIKIET» Publ., 2001.
 12. Nuclear energy - The solution to climate change? Nikolaus Muellner, Nikolaus Arnold, Klaus Gufler [et al.], 2021. Energy Policy 155 (2021), 1-10.
 13. Kaplienko, A. 2023. Renewable energy sources: is it a panacea for global electricity generation or not? / Kaplienko A., Gabaraev B. // Russian Journal "Obozrevatel/Observer" 3 (2023), 27-36.
 14. Pershukov, V. Paving the Way to Green Status for Nuclear Power / V. Pershukov, V. Artisyuk, A. Kashirsky // Sustainability. Sustainability 2022, 14, 9339. <https://doi.org/10.3390/su14159339>. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/sustainability-14-09339-v2-2.pdf (accessed 21.05.23)
 15. Global Energy and CO2 Status Report 2018 // International Energy Agency. URL: https://www.eenews.net/assets/2019/03/26/document_cw_01.pdf (accessed 05.02.2021).
 16. Kharitonov, V. V. / V.V. Kharitonov // Scenarii razvitiya mirovoj yadernoj en-ergetiki [Development of the world nuclear energy scenarios] // 2019. Atomnyj ekspert. № 1, S. 47-53. (in Russian)
 17. Harvey, S. Spurring youth interest in nuclear // IAEA Bulletin. 2021. P. 20-21
 18. Bilbao y León, S. Finding a new voice for nuclear // IAEA Bulletin. 2021. P. 28-29
 19. Gorin, N. V. Arguments for Different Categories of the Population in the Interests of Support Formation of the Development of Nuclear Energy / N. V. Gorin, E. V. Kuznetsov, B. K. Vodolaga [et al.] // Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference, 2023. – pp. 24-28, https://www.sphti.ru/wp-content/uploads/2023/04/%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%8B_2023.pdf f. (accessed 21.05.23).
 20. Fostering Respectful Attitude towards Nuclear Industry N.V. Gorin, N.L. Abramova, S.V. Nechaeva, O.S. Golovikhina // Public Administration E-journal. 2021. № 87. P. 6-24. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18
 21. Nuclear Energy as a Basis for Sustainable Development / N.V.Gorin; B.K.Vodolaga; V.P.Kuchinov; V.V.Shidlovskiy // Public Administration E-journal. 2022. № 95. P. 7-19. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-95-7-19.
 22. Detection of Indications of Nuclear Non-Proliferation Breaches by States Importing Fast Reactors with Closed NFC Installations Atomic Energy Gorin N.V., Karmanov A.L., Pervinenko V.N., Vlasov V.V., Teplykh N.A., Kuchinov V.P., Chebeskov A.N., Shidlovsky V.V. 2022. vol. 131. no 4. pp. 229-233.
 23. Barriers on Ways of Nuclear Distribution at Export of the Russian Fast Reactors with Closed Nuclear Fuel Cycle (on an example Brest ОД-300) / Gorin N.V., Kuznetsov E.V., Kuchinov V.P., Chebeskov A.N., Moiseev A.V., Shidlovskiy V.V., Krivtsov A.V., Vestnik NYAC. 2021. №. 4 (88), P. 16-21. doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21
 24. Nuclear Non-Proliferation Security on Exportation of fast Reactors with a Closed Fuel Cycle / Gorin N.V., Voloshin N.P., Churikov YU.I., Chebeskov A.N., Kuchinov V.P., Vasilyev A.P., Moiseev A.V., Shepelev S.F., Skvortsov D.A., Zhurin S.I., Shidlovskiy V.V., Krivtsov A.V. (2021) // Atomic energy. T. 130, v.1, C. 53-56.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕВОДА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В ПОДКРИТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МЕТОДОМ МАРКОВСКОЙ ЦЕПИ

Н. Н. Ошканов, Г. Е. Ваулин, М. А. Метельникова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

Цель исследования – определение причин недостижения подкритического состояния ядерного реактора при срабатывании быстрой аварийной защиты (БАЗ). Цепная ядерная реакция (ЦЯР) последовательности нейтронных циклов деления соответствует марковской цепи (процессу), поэтому марковская кинетика соответствует кинетике ЦЯР и позволяет вывести уравнение кинетики последовательным произведением выходных плотностей нейтронов последовательности циклов. Согласно марковской кинетике большой ступенчатый скачок отрицательной реактивности, характерный для срабатывания БАЗ, вызывает резкое снижение плотности мгновенных нейтронов и рост излишка запаздывающих нейтронов из-за медленного распада их предшественников. Их растущий избыток образует устойчивую вторичную цепную реакцию, которая по мере прекращения исходной цепной реакции обеспечивается только запаздывающими нейтронами. Классическая кинетика не отмечает устойчивой вторичной ЦЯР, наоборот, постулирует асимптотическое снижение плотности нейтронов до нуля за счет снижения образования запаздывающих нейтронов. Показано, что параллельная работа систем быстрого и медленного ввода отрицательной реактивности приводит к постепенному снижению общей плотности нейтронов до подкритического состояния.

Ключевые слова: аварийная защита; кинетика реактора; марковская цепь; подкритическое состояние; реактивность.

1. Введение

В данной работе рассматривается поведение мощности ядерного реактора до подкритического состояния при срабатывании быстрой аварийной защиты (БАЗ) ядерного реактора без внешних обратных связей в однорупповом представлении запаздывающих нейтронов (ЗН). Для этого используется вывод и решение нестационарного уравнения кинетики в представлении ЦЯР в модели марковской цепи.

ЦЯР – основополагающий процесс в ядерном реакторе и по определению представляет собой цепь последовательных циклов делений ядер, в каждом из которых образующиеся нейтроны осуществляют взаимодействие с ядрами активной зоны нейтронов. Результат взаимодействия – поглощение нейтронов делящимися ядрами с последующим их делением, образованием тем самым следующего деления. Таким образом, выходная плотность нейтронов предыдущего цикла является входной плотностью нейтронов следующего цикла.

Марковская цепь (процесс) представляет собой последовательность событий, в которой вероятность каждого события зависит только от события, непосредственно предшествующего ему. ЦЯР является последовательностью событий (делений), в которой вероятность нового события (нового деления) зависит только от предшествующего ему события (предшествующего деления). Таким образом, ЦЯР соответствует марковской цепи [1, с. 25, 26, 28].

Кинетика марковской ЦЯР существенно отличается от классической кинетики. В последней ЦЯР рассматривается как единый непрерывный процесс, свидетельством тому является интегрирование уравнения непрерывного переноса нейтронов без учета разрывов, в то время как интегрируемая функция плотности нейтронов имеет такие

разрывы в начале каждого цикла в виде скачкообразного деления ядер. Такое интегрирование недопустимо [2, с. 225–231], но выполнено путем исключения скачков плотности нейтронов при делениях. Поэтому результат интегрирования образует существенно приближенную классическую кинетику, которая может применяться только на начальном участке ЦЯР.

Цель исследования – изучение поведения мощности ядерного реактора после срабатывания БАЗ (скачкообразного быстрого ввода большой отрицательной реактивности) до поддержания подкритического состояния и, как следствие, соответствия БАЗ требованиям правил ядерной безопасности (ПБЯ) [3].

Актуальность исследования определяется аспектами соблюдения ядерной безопасности реактора, т. к. экстренный ввод отрицательной реактивности в результате самоограничения мощности реактора, аналогичного самоограничению при вводе положительной реактивности [4, с. 39–45], может привести к потере функции полного останова реактора.

2. Метод исследования

Исследование проводится, как это принято в кинетике ядерных реакторов, для точечной модели теплового ядерного реактора с топливом уран-235 без внешних обратных связей с однопрупповым представлением ЗН. Такой выбор позволяет учитывать непосредственные нейтронно-физические процессы активной зоны реактора, в котором происходит срабатывание БАЗ [5, с. 9].

Поведение плотности нейтронов в активной зоне реактора изучается с помощью численного эксперимента решения уравнения кинетики марковской цепной ядерной реакции, что позволяет в числовом и графическом исполнении зафиксировать переход между разными процессами в активной зоне.

3. Результаты и обсуждение.

3.1. Марковская кинетика

В цепной реакции одновременно происходят процессы скачкообразного деления с образованием мгновенных нейтронов (МН) и «новых» предшественников ЗН в каждом коротком цикле, а также медленный, непрерывный в течение многих циклов ЦЯР радиоактивный распад предшественников ЗН с периодом распада, значительно превышающим длительность нейтронного цикла.

В начале первого цикла стационарного режима цепной реакции плотность нейтронов в конце предыдущего цикла n_0 вызывает деление ядер с образованием МН с плотностью $\nu n_0(1 - \beta)$ и «новых» предшественников ЗН плотностью $\nu n_0\beta$, где ν – полное число нейтронов, испускаемых на одно деление; β – эффективная доля запаздывающих нейтронов в полном числе нейтронов деления. Одновременно в цикл поступают запаздывающие нейтроны от нераспавшихся предшественников ЗН предыдущих циклов, концентрация которых к началу каждого цикла составляет $\nu n_0\beta e^{-\lambda t} / (1 - e^{-\lambda \tau})$ [4, с. 39–45], где λ – постоянная радиоактивного распада предшественников (s^{-1}); τ – средняя длительность цикла (с).

Марковская кинетика соответствует кинетике ЦЯР и позволяет вывести уравнение кинетики последовательным произведением выходных плотностей нейтронов последовательности циклов. Поэтому ввод скачка коэффициента размножения k (реактивности) в стационарный режим реактора изменяет стационарную плотность нейтронов и, как показано в [4, с. 39–45], последовательное произведение выходных плотностей нейтронов (как и в марковской ЦЯР) образует сходящуюся геометрическую прогрессию со знаменателем $k(1 - \beta)$. Сумма ее m -членов (циклов) определяется как:

$$\frac{n_m}{n_0} = k^m (1 - \beta e^{-\lambda\tau})^m + \beta e^{-\lambda\tau} \frac{1 - k^{m-1} (1 - \beta e^{-\lambda\tau})^{m-1}}{1 - k(1 - \beta e^{-\lambda\tau})}, \quad (1)$$

где k – эффективный коэффициент размножения нейтронов в активной зоне реактора в конце цикла перед вводом скачка реактивности нового цикла; n_m – выходная плотность нейтронов m -цикла.

Запаздывающие нейтроны начинают формироваться в начале цикла и исчезают (поглощаются) в его конце, т. е. существуют только в течение рассматриваемого цикла [4, с. 39–45].

При вводе отрицательного скачка реактивности $\rho = 1/(1 - k)$ величина $k(1 - \beta e^{-\lambda\tau}) < 1$ для любой вводимой реактивности. Поэтому при отрицательном скачке величина первого члена (1) с увеличением числа циклов m асимптотически стремится к нулю, а второй член стремится к стабилизации плотности нейтронов. Соответственно, асимптотическая относительная плотность нейтронов при $m \rightarrow \infty$ равна:

$$\frac{n_{m \rightarrow \infty}}{n_0} = \frac{\beta e^{-\lambda\tau}}{1 - k(1 - \beta e^{-\lambda\tau})} = \frac{1 - \rho}{1 - \rho/\beta e^{-\lambda\tau}}, \quad (2)$$

а не классическому снижению ее асимптоты до нуля.

Ввод в реактор отрицательной реактивности порядка $0,1\beta$ характерен для рутинной эксплуатации реактора. При таком скачке реактивности точечный реактор в соответствии с (2) снижает свою мощность до уровня саморегулирования 91,6 %.

Ввод реактивности (-1β) характерен для скачкообразного отключения одной из петель теплоотвода реактора, при котором мощность реактора по асимптоте снизится до стационарного уровня 50 %.

Ввод реактивностей $(-5,5\beta)$ и (-11β) характерен для срабатывания аварийной защиты, которая должна перевести реактор в подкритическое состояние.

Ввод гипотетической реактивности (-100β) показывает, что даже ввод отрицательной реактивности такой величины оставляет реактор на уровне 1,6 %, что выше значения β (0,65 %), гарантирующего безопасное состояние реактора.

Таким образом, ввод отрицательного скачка реактивности асимптотически устанавливает постоянный уровень плотности нейтронов. В соответствии с (2) он не может быть ниже β . Поскольку это превышает минимальный контролируемый уровень мощности реактора, то это свидетельствует о том, что реактор по окончании переходного периода после срабатывания аварийной защиты остается в критическом состоянии при ее любой эффективности.

3.2 Быстрый ввод большой отрицательной реактивности

Проведено численное решение (2) в соответствии с марковской кинетикой при вводе большой реактивности $(-5,5\beta)$ в урановую активную зону точечного теплового реактора ($\beta = 0,0065$, $\tau = 0,001$ с, $\lambda = 0,0767$ с⁻¹ [2, с. 15]) и сравнение результата с расчетом по классической кинетике (3), выполненного с обычно применяемыми преобразованиями Лапласа [2, с. 35]:

$$\frac{n_m}{n_0} = \frac{1}{\beta - \rho} \left[\beta \exp\left(\frac{\lambda\rho}{\beta - \rho} t\right) - \beta \exp\left(-\frac{\beta - \rho}{\tau} t\right) \right]. \quad (3)$$

Результаты расчета приведены на рис. 1, в котором кривая 1 соответствует (1), кривая 3 соответствует (3).

Вследствие отрицательности скачка реактивности реактор переходит в подкритический режим реактора со снижением исходных размножающих свойств активной зоны.

Согласно марковской кинетике после ввода реактивности относительная плотность нейтронов (кривая 1) снижается и к 10-му циклу становится равной 0,737. К

30-му циклу она снижается до 0,400 и к 200-му циклу (0,2 с) стабилизируется на уровне 0,159. Далее она сохраняется на этом уровне.

Согласно классической кинетике снижение общей относительной плотности нейтронов практически совпадает до 80-го цикла с общей относительной плотностью (кривая 2) и с марковской кинетикой (кривая 1). Начиная с 200-го цикла, кривая 2 значительно отличается от кривой 1. К 1000-му циклу разность плотностей нейтронов по (1) и (3) различается уже на 8 %. Далее классическая кривая асимптотически снижается к нулю по экспоненте первого члена (3) с постоянной времени $(\rho - \beta)/\rho\lambda \approx 12\text{с}$ (полупериод распада $\approx 8\text{с}$), который зависит как от величины постоянной распада предшественников, так и от величины реактивности.

Детальное рассмотрение происходящих процессов обнаруживает следующие явления.

Согласно (1) ввод отрицательной реактивности снижает образование мгновенных нейтронов исходной цепной реакции (кривая 3) и общей плотности нейтронов (кривая 1), т. е. на первом этапе обусловлена быстрым темпом снижения плотности мгновенных нейтронов (кривая 3). Вследствие большого периода полураспада предшественников в сравнении с длительностью цикла (8 с и 0,001 с соответственно) плотность запаздывающих нейтронов (кривая 4) повышается за счет возникающего их избытка из-за невосребованности снижающейся ЦЯР.

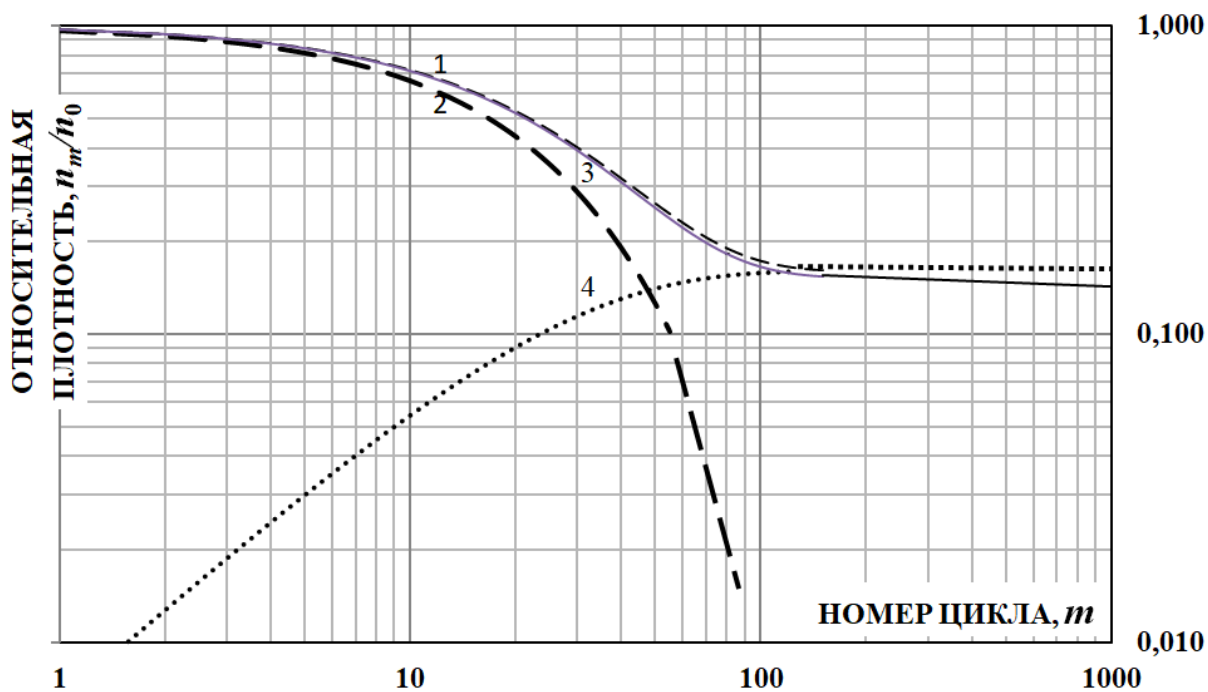


Рис. 1. Поведение относительной плотности нейтронов после ввода отрицательной реактивности ($-5,5\beta$) в урановую активную зону точечного теплового реактора; 1 (пунктир) – марковская кинетика; 2 (пунктир) – мгновенные нейтроны; 3 (сплошная) – классическая кинетика; 4 (точечная) – запаздывающие нейтроны

Постепенно избыток запаздывающих нейтронов замещает выбывающие исходные мгновенные нейтроны, сохраняя ЦЯР. В конце затухающая исходная ЦЯР на мгновенных нейтронах постепенно замещается на затухающую ЦЯР на ЗН (кривая 4). Постепенно, к 200-му циклу (0,2 с), образуется стационарный режим вторичной цепной реакции на ЗН, тем самым подкритический режим прекращается и переходит в критический, что свидетельствует о неполном выполнении требований правил ядерной безопасности [3].

По классической кинетике (3) поведение плотности нейтронов можно оценить только качественно, т. к. формула не содержит явного разделения типа нейтронов, как

это происходит по марковской кинетике. Поведение общей плотности нейтронов ЦЯР по классической кинетике (кривая 3) до момента возникновения новой цепной реакции совпадает с марковской кривой 1. Но, в отличие от (1), вторичная ЦЯР по (3) является затухающей и после 0,2 с (200-го цикла) асимптотически снижается к нулю, имитируя требование правил ядерной безопасности сохранения подкритического режима после срабатывания БАЗ.

Такое отличие результатов ввода реактивности в реактор, очевидно, вызвано приближенным характером вывода и решения уравнений кинетики в классической теории, в т. ч. из-за отсутствия современной компьютерной техники [5, с. 117]. Кстати, в настоящее время применить ее сложно из-за большого числа шагов вследствие малой длительности времени жизни мгновенных нейтронов [5, с. 117]. Марковская кинетика не требует применения сложной компьютерной техники.

Очевидно, что система регулирования мощности реактора в обоих случаях должна иметь дополнительную систему, необходимую для управления цепной реакцией, если БАЗ не обеспечивает перевод реактора в подкритическое состояние [3]. Это может быть медленная система компенсации выгорания топлива, которая по сигналу БАЗ осуществляет медленный ввод реактивности.

Для оценки возможности достижения подкритического состояния проведен численный эксперимент для случая параллельной работы систем быстрого и медленного ввода реактивности.

3.3 Параллельный быстрый и медленный ввод реактивности

Для определенности приняты равными $(-5,5\beta)$ эффективности быстрой системы БАЗ и медленной системы, в которой реактивность вводится в активную зону за 300 с. Также для определенности медленный ввод поглотителей аппроксимирован скачками длительностью 1 с, реактивность каждого из которых представляет ступенчатый скачок реактивности величиной $(-5,5\beta)/300\text{с} = -0,01833\beta/\text{с}$ ($k_N = 0,9999$). В соответствии с (2) система аварийной защиты с эффективностью $(-5,5\beta)$ снижает (рис. 1) за 1 с плотность нейтронов до 0,1594, а каждый секундный скачок медленной системы в соответствии с (1) снижает эту величину последовательными скачками в соответствии с (2) каждый в $1/0,9849 = 1,015$ раз. За 300 с после срабатывания БАЗ уровень 0,1594 ежесекундными скачками медленной системы снизится в $1,015^{300} = 87$ раз, т. е. плотность нейтронов за 300 с снизится с 0,1594 до $0,001832 = 0,28\beta$, что имеет подкритический уровень плотности нейтронов. Для точечного реактора это произойдет именно так, он по определению свободен от действия внешних обратных связей, для компенсации которых в реакторах вводится медленная система. Тем самым параллельно-последовательный ввод отрицательной реактивности обеспечивает подкритический режим точечного реактора.

4. Выводы

В настоящем исследовании установлено что:

1. Ввод ступенчатого скачка отрицательной реактивности любой величины в ядерный реактор в его точечной модели приводит к асимптотическому снижению его мощности до ненулевого стационарного уровня, зависящему от вводимой реактивности и эффективной доли запаздывающих нейтронов.

2. Причина ненулевой мощности реактора при вводе отрицательной реактивности – рост доли запаздывающих нейтронов до уровня, образующего вторичную цепную ядерную реакцию взамен существовавшей до вводе реактивности.

3. Быстрая аварийная защита реактора любой эффективности не обеспечивает задачу поддержания подкритического режима реактора вследствие образования в нем вторичной цепной реакции.

4. Требуемое правилами ядерной безопасности совместное действие быстросрабатывающей аварийной защиты и медленнодействующей системы ввода в

реактор отрицательной реактивности позволяет обеспечить после ввода отрицательной реактивности подкритический режим реактора.

Данные выводы рекомендуются учесть при эксплуатации ядерных реакторов и разработке их систем аварийной защиты.

5. Благодарности

Авторы благодарят С. Е. Щеклеина, заведующего кафедрой атомных станций Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, за поддержку и ценные замечания и дискуссии по выполнению настоящего исследования.

6. Список литературы

1. *Ошканов, Н. Н.* Сравнительный анализ классической кинетики ядерного реактора и кинетики марковской цепной реакции деления / Н. Н. Ошканов, Я. О. Комарова, П. А. Михайлова // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – №3 (7). – С. 25, 26, 28.
2. *Хетрик, Д. Л.* Динамика ядерных реакторов / Д. Л. Хетрик. – М. : Атомиздат, 1972. – С. 15, 31, 35.
3. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций, НП-082-07. Постановление Ростехнадзора от 10.12.2007, пп.2.3.1–2.3.2. М., 2007.
4. *Oshkanov, N. N.* On nonconformity of the classical reactor kinetics to physics of a chain reaction / N. N. Oshkanov // SGEM2018. – 2018. – Vol. 18. – № 4.1. – P. 39–45. – DOI: 10.593/sgem2018/4.1. ISBN 978-619-7408-44-7.
5. *Селезнев, Е. Ф.* Кинетика реакторов на быстрых нейтронах / Е.Ф. Селезнев. – М. : Наука, 2013 – С. 9, 117.

Сведения об авторах:

Ошканов Николай Николаевич, к. т. н., профессор, кафедра атомной энергетики УрФУ, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: nickolai.oshkanov@yandex.ru.

Ваулин Глеб Евгеньевич, студент УрФУ, г. Екатеринбург, Россия.

Метельникова Мария Александровна, студентка УрФУ, г. Екатеринбург, Россия.

SOLVING THE PROBLEM OF TRANSFERRING A NUCLEAR REACTOR INTO SUBCRITICAL MODE BY METHOD OF MARKOV CHAIN

N. N. Oshkanov, G. E. Vaulin, M. A. Metelnikova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

The purpose of the study is to determine the reasons why a nuclear reactor cannot reach subcritical state when the fast emergency protection system (FEPS) is triggered. The nuclear chain reaction (NCR) of a sequence of fission neutron cycles corresponds to a Markov chain (process), so Markov kinetics corresponds to the kinetics of a NCR and allows one to derive the kinetics equation by the sequence product of the output neutron densities of a sequence of cycles. According to the Markov kinetics, the large stepwise jump in reactivity characteristic of FEPS actuation causes a sharp decrease in the density of prompt neutrons and a growing excess of delayed neutrons due to the slow decay of their precursors. Their growing excess forms a stable secondary chain reaction, which, as the initial chain reaction is terminated, is provided only by delayed neutrons. Classical kinetics does not note a stable secondary NCR and, on the contrary, postulates an asymptotic decrease in the neutron density to zero due to a decrease in the formation of delayed neutrons. It is shown that the parallel operation of fast and slow negative reactivity insertion systems leads to a gradual decrease in the total neutron density and puts the reactor into a subcritical state.

Key words: emergency protection; Markov chain; reactivity; reactor kinetics; subcritical state.

References

1. Oshkanov, N. N. Comparative Analysis of the Classical Kinetics of a Nuclear Reactor and Kinetics of a Markov Fission Chain Reaction / N. N. Oshkanov, Ya. Komarova, P. A. Mikhaylova // Research Trajectory – Man, Nature, Technology. – 2023. – №3 (7). – P. 25–26, 28.
2. Hetrick, D. L. Dynamics of Nuclear Reactors. / D. L. Hetrick // M.: Atomizdat. 1972. – P. 15, 31, 35.
3. Nuclear Safety Requirements for Reactor Systems of Nuclear Power Plants, NP-082-07. Order of Rostekhnadzor, 10.12.2007 – pp. 2.3.1–2.3.2. M. : 2007. .
4. Oshkanov N. N. On Nonconformity of the Classical Reactor Kinetics to Physics of a Chain Reaction. / N. N. Oshkanov // SGEM2018. Vol. 18, № 4.1. – P. 39–45. – DOI: 10.593/sgem2018/4.1. ISBN 978-619-7408-44-7.
5. Seleznev, E. F. Fast Breeder Reactor Kinetics / E. F. Seleznev // – M.: Nauka. 2013. – P. 9, 117.

ПОДХОДЫ К СТАТИСТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ОЦЕНКИ ФАКТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ ПОДРОСТКОВ

Е. Д. Константинова¹, Т. А. Маслакова¹, А. Н. Варакин¹, С. С. Делец²

¹Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России), г. Челябинск, Россия

В методической статье обсуждаются вопросы учета особенностей работы с медико-биологическими данными (МБД) при решении эпидемиологических задач с помощью статистических методов. Подчеркивается важность правильного выбора статистических методов анализа МБД, а также наглядного графического представления экспериментальных численных результатов из области эпидемиологии. Был ретроспективно проанализирован массив МБД, содержащий 809 случаев и 185 переменных разного типа. В качестве метода анализа использована множественная линейная регрессия с применением подхода, основанного на скользящем среднем. Решена практическая задача построения моделей, описывающих сопряженность индекса массы тела (ИМТ) подростков с пищевыми и некоторыми непищевыми факторами. Исследована распространенность дефицита массы тела, избыточной массы тела и ожирения среди подростков – учащихся колледжей. Результаты настоящего исследования могут быть востребованы при разработке профилактических мер по оптимизации питания в организованных коллективах, а также способствуют повышению уровня гигиенической грамотности заинтересованного круга лиц.

Ключевые слова: статистическое моделирование; медико-биологические данные; множественная линейная регрессия; фактическое питание подростков.

1. Введение

Развитие и массовое распространение прикладных статистических пакетов делает анализ МБД доступным практически для любого исследователя. Однако кажущаяся простота подобного анализа легко может ввести в заблуждение. Корректный результат может быть получен исключительно при правильном выборе статистических методов и учете особенностей работы с МБД. Обязательное соблюдение этих условий позволит исключить искажение и неправильное представление результатов.

Тема настоящей статьи – решение практической задачи эпидемиологии с помощью комплекса статистических методов. В предметном плане это означает поиск алгоритмов, которые будут выдавать ответ для каждого нового случая.

Стандартной задачей эпидемиологии является, например, следующее: есть список переменных, представляющих собой МБД, имеющих отношение к какой-либо медицинской проблеме, и требуется объяснить или спрогнозировать изменение одной из них. Для этого в биостатистике применяется статистическая модель – формальное представление взаимоотношений между переменными, которую потом можно использовать для желаемого объяснения или прогноза. Безусловно, на этом этапе должны появиться определенные математические идеи, но база должна быть понятна для специалиста предметной области (не математика). Другими словами, желательно получение интуитивно понятных решающих правил модели для использования специалистами – медиками и биологами.

МБД имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выборе

метода статистического моделирования. Достаточно подробно мы останавливались на них в предыдущем исследовании [1]. Так, вследствие зашумленности реальных МБД первоочередная задача при работе с ними – проверка на наличие «выбросов» – значений, не характерных для данной выборки. Все выбросы должны быть удалены для исключения искажения результатов анализа. В одной задаче анализа МБД исследователю зачастую приходится иметь дело не только с переменными разных типов (количественными, ранговыми и пр.), но и учитывать их коррелированность. При выборе метода, помимо типа переменных, необходимо принимать во внимание вид их распределения [2, 3].

Нельзя также обойти вниманием дизайн исследования. Как уже было сказано, основная цель в исследовании (при любом виде дизайна) – установление связи между предполагаемыми факторами риска (прогностическими факторами) и событиями (заболевание, смертность и т. п.). При этом вопрос о направленности причинно-следственной связи весьма сложен. В таком типе дизайна, как, например, одномоментное исследование, он спорен, поскольку фиксация определенного состояния и уровня некоторого фактора не позволяет судить о том, явился ли фактор причиной некоторого состояния исследуемого, или состояние вызвало определенный уровень исследуемого фактора [4].

Стоит отметить также, что любой тип дизайна сопровождается так называемыми случайными и систематическими ошибками – смещениями от истинных значений в силу некоторых особенностей исследования [5, 6].

Очевидна также невозможность получения 100 %-й точности результатов моделирования, поскольку мы имеем дело с «паутиной причинности» возникновения патологии. Ни один фактор риска возникновения болезни сам по себе не является непосредственной причиной заболевания, он может лишь увеличить или изменить вероятность его появления.

Что касается непосредственно выбора статистического метода, то про нежелательность применения моделей типа «черного ящика» с непрозрачной работой алгоритма говорит все большее число исследований [7, 8]. Получая решающее правило модели «черного ящика», мы не знаем, откуда взялось такое заключение и насколько мы можем быть в нем уверены: нам приходится либо принимать, либо отказываться от него. Не понимая, как алгоритм выдает ответ, мы не можем исследовать его на наличие неявных, но систематических ошибок.

Осознание необходимости в контролируемости алгоритмов, потенциально влияющих на жизнь людей, растет, и требования, чтобы выводы имели понятное объяснение, в некоторых странах уже включаются в законодательство. Так, в [9] одной из основных рекомендаций при выборе метода оценки профессионального риска названо обеспечение возможности прослеживания, воспроизводимости и проверки процесса и результатов, а также простоты и понятности применяемого метода.

Такие требования препятствуют использованию сложных закрытых алгоритмов при обработке МБД и могут приводить к предпочтению (довольно старомодных) регрессионных алгоритмов, которые обеспечивают математическое представление отношений между набором независимых (объясняющих) переменных и зависимой переменной (переменной отклика) [10–14].

На современном этапе одной из серьезных проблем человечества становится избыточная масса тела и ожирение, основа формирования которых – дисбаланс между потреблением веществ и реальными потребностями в них [15, 16]. Дети и подростки с отклонениями в состоянии питания составляют группу риска развития заболеваний пищеварительной, сердечно-сосудистой и костно-мышечной систем, а также сниженной резистентности [17–21]. Учащиеся профессионально-технических колледжей представляют собой особо уязвимую с точки зрения здорового образа жизни группу. Вместе с тем качество питания учащихся организаций среднего профессионального образования – фактор формирования будущего трудового потенциала общества.

В данной работе проведен анализ массива МБД с использованием методов статистического моделирования на примере данных о распространенности дефицита массы тела, избыточной массы тела и ожирения, а также сопутствующих пищевых и непищевых факторов среди подростков – учащихся колледжей. Результаты представлены в наглядной форме, доступной для специалистов – не математиков.

2. Материалы и методы

Был ретроспективно проанализирован массив МБД, содержащий 809 случаев и 185 переменных разного типа. У 401 юноши и 408 девушек в возрасте от 15 до 17 лет, обучающихся в колледжах г. Челябинска, проведены измерения роста и массы тела, а также опрос о питании по утвержденной методике, об уровне физической активности подростков, об уровне образования и ИМТ родителей, семейного дохода [22]. Определена распространенность дефицита массы тела, избыточной массы тела и ожирения по референсным кривым для детей и подростков 5–19 лет, предложенным ВОЗ [23]. Критерии Стьюдента, Манна – Уитни и Краскела – Уоллиса использовались для определения статистической значимости различий средних и медиан. Для оценки связи ИМТ подростков с показателями пищевой ценности рациона, уровнем физической активности и ИМТ родителей были построены модели множественной линейной регрессии с применением метода скользящего среднего.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных статистических программ Statistica 10 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). Статистическая значимость различий оценивалась на уровне значимости $\alpha=0,05$.

3. Результаты и обсуждение

Описательная статистика

Массив МБД настоящего исследования содержал переменные разного типа.

Количественные непрерывные переменные представлены такими показателями, как Возраст, Рост, Вес, ИМТ, Окружность талии (ОТ), Толщина кожной складки, Индекс курения, Пищевая ценность рациона (жиры, белки, углеводы, витамины и минеральные вещества). Показатели пищевой ценности рациона распределены по логнормальному закону. Остальные перечисленные показатели имели нормальное распределение.

Другая группа переменных – это *категоризованные переменные*. К ним относились категория ИМТ (нормальная масса, дефицит и выраженный дефицит массы, избыток и выраженный избыток массы), характеристики Кратности питания, Образование родителей и Материальная обеспеченность семьи. С точки зрения биостатистики это качественные (ранговые) переменные.

Дихотомические переменные, принимающие только два значения 0 и 1 (да/нет), представлены в нашем исследовании показателями Пол и Курение.

В качестве описательной статистики специалисты-медики традиционно используют табличную форму представления данных. Между тем идеально подходящей формой для быстрого визуального анализа информации справедливо считается графическое представление [24]. Более того, графическое представление данных предпочтительно, поскольку позволяет визуально выделить закономерности или аномалии в численных данных, а также дает первичную оценку набора данных для возможности применения в дальнейшем более сложных инструментов анализа. Фактически это те же данные, представленные в более наглядной, интуитивно понятной форме.

На рис. 1 представлено распределение юношей и девушек по категориям ИМТ с учетом возраста [23].

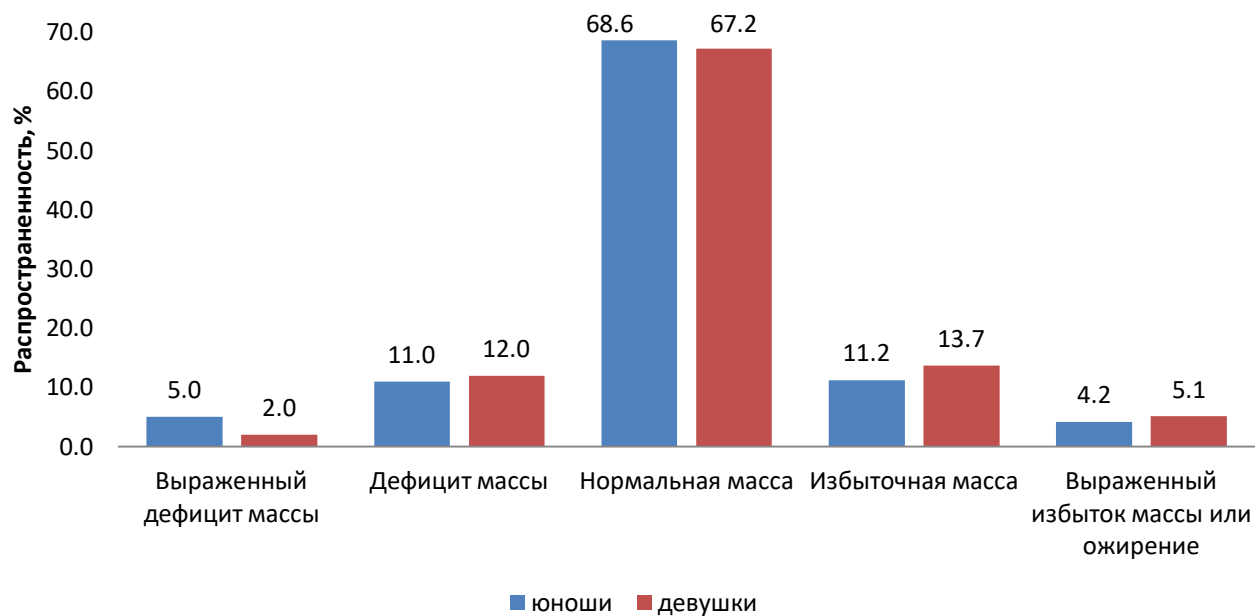


Рис. 1. Распределение юношей и девушек по категориям ИМТ

Около 67–68 % подростков имели нормальную массу тела, недостаточную или избыточную – около 11–13 %, и резко отличную от нормы ИМТ имеют около 5 % подростков. Распределение юношей и девушек по ИМТ с учетом возраста было близко к эталонной популяции ВОЗ [23]. Не было обнаружено статистически значимых различий между девушками и юношами в каждой из категорий ИМТ.

Визуализация связи ИМТ подростков с ИМТ родителей представлена на рис. 2.

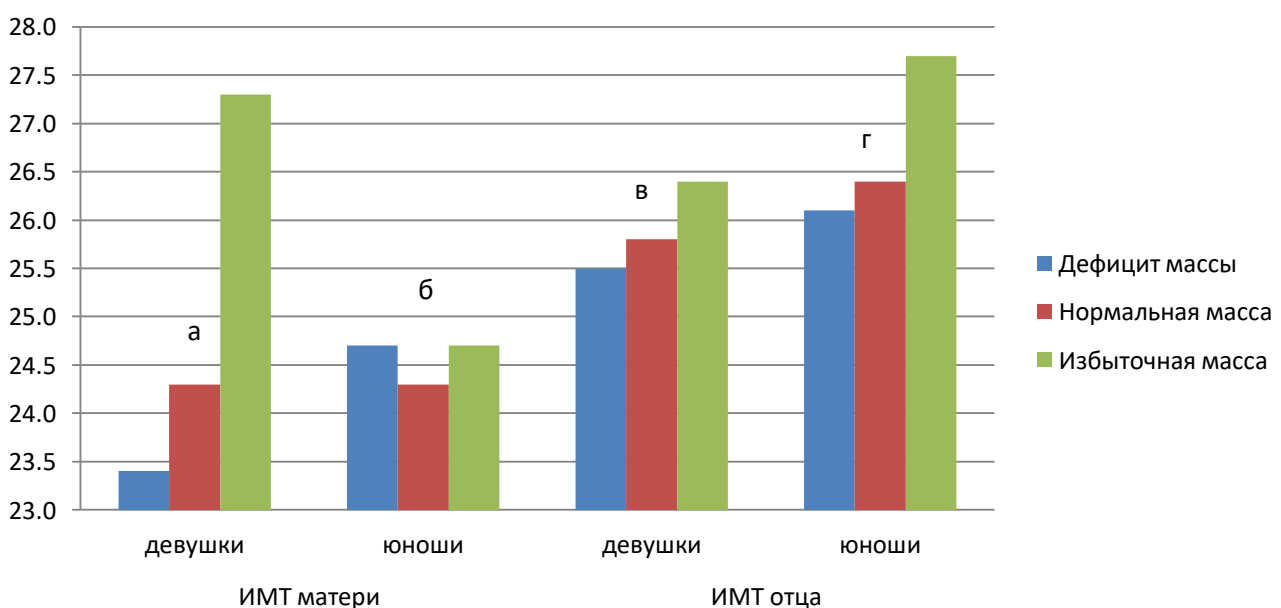


Рис. 2. Средние значения ИМТ родителей в группах подростков с дефицитом массы тела, нормальной массой тела и избыточной массой тела, кг/м²

В каждой из четырех групп (а – г) подростки разделены по трем категориям ИМТ (дефицит массы, нормальная и избыточная). Таким образом, левый столбец группы а показывает среднее значение ИМТ матерей (ИМТ_м), дочери которых имеют недостаточную массу тела (ИМТ_м = 23,4 кг/м²). Средний столбец группы а показывает среднее значение ИМТ матерей, у которых дочери имеют нормальную массу тела (ИМТ_м = 24,3 кг/м², т. е. несколько выше, чем в предыдущем случае, но различия не являются статистически значимыми (p=0,08)). Наконец, правый столбец показывает

среднее значение ИМТ_м, у которых дочери имеют избыточную массу тела. В этом столбце ИМТ_м = 27,3 кг/м², различия с группами слева являются статистически значимыми (p < 0,001). Таким образом, связь ИМТ девушек и ИМТ матерей существует. В то же время ИМТ юношей не имеет связи с ИМТ матери (группа б).

Группа в показывает средние значения ИМТ отцов для различных категорий ИМТ девушек. Статистически значимые различия выявлены для групп с дефицитом и избыточной массой тела (p=0,025). Группа г показывает средние значения ИМТ отцов для различных категорий юношей: у тучных юношей отцы имеют повышенный ИМТ. Статистически значимые различия выявлены в группах с дефицитом и избыточной массой тела (p=0,05).

Значимость различий оценивалась попарно, с использованием t-критерия Стьюдента, поскольку показатель ИМТ имеет нормальное распределение.

Таким образом, обнаружена статистически значимая связь ИМТ девушек и ИМТ матерей. Имеется связь ИМТ отцов с ИМТ подростков обоих полов, но только в группах с дефицитом и избыточной массой тела (p < 0,05). Наши результаты хорошо согласуются с выводами предыдущего исследования, где была обнаружена связь между ИМТ девочек и матерей и не обнаружена связь между ИМТ мальчиков и их матерей, ИМТ девочек или мальчиков и их отцов [25]. В другом исследовании, проанализировавшем данные порядка 100 000 детей и их родителей из шести стран, было обнаружено, что наследственная передача ИМТ наблюдалась во всех странах, независимо от их уровня экономического развития. В частности, оказалось, что у очень худых детей доля ИМТ родителей составляет около 20 % в целом, в то время как у детей, страдающих от ожирения, эта цифра достигает 60 % от ИМТ обоих родителей [26].

Рис. 3 демонстрирует отклонение от нормы в фактическом питании юношей и девушек.

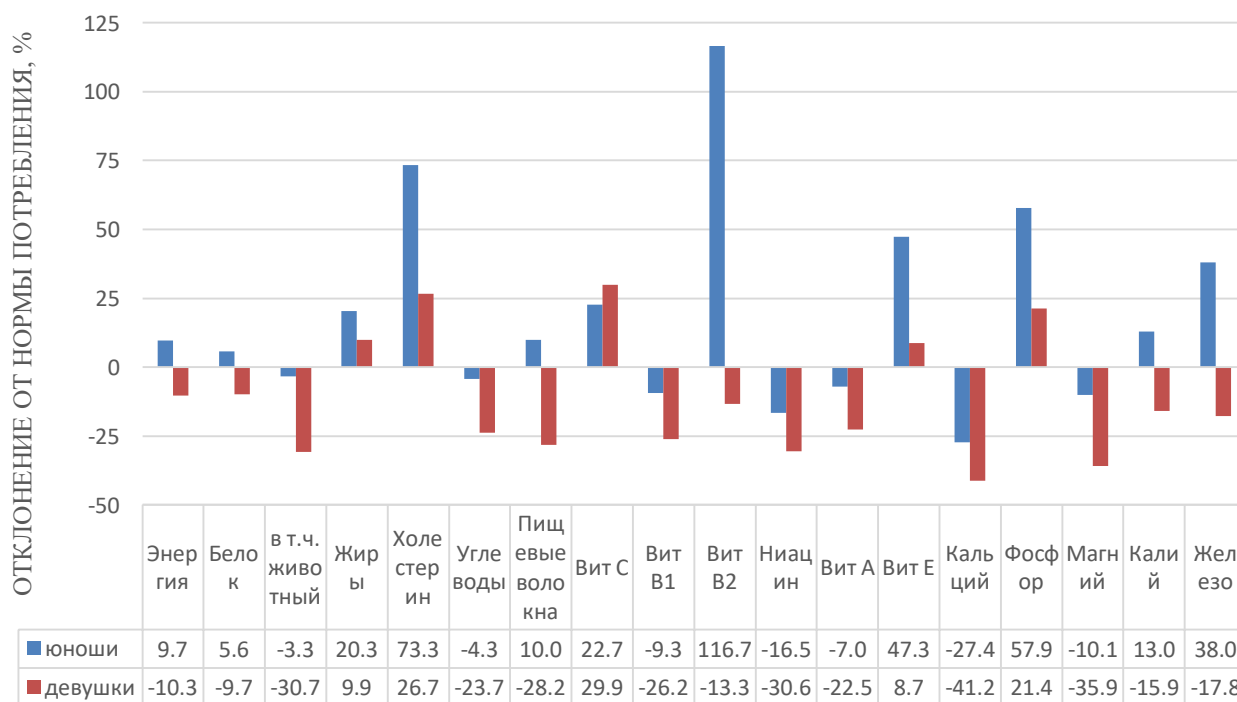


Рис. 3. Отклонение от нормы потребления пищевой ценности рациона, витаминов и минералов для юношей и девушек

Основное внимание следует обратить на показатели с наибольшим отклонением от нормы. За норму потребления на рис. 3 взято X=0. Наибольшие отклонения по избыточному потреблению (выше оси X) отмечены только для юношей по показателям: витамин В2, холестерин, фосфор, витамин Е, железо. Наибольшие

отклонения по недостаточному потреблению (ниже оси X) отмечены только для девушек по показателям: кальций, магний, белок животного происхождения, ниацин, пищевые волокна.

Выявлены значительные отличия в пищевой ценности рациона, потреблении витаминов и минералов между юношами и девушками. Причем как в случае разнонаправленных отклонений в потреблении (витамин B2, железо, пищевые волокна), так и однонаправленных (холестерин и витамин E).

Статистическое моделирование

При выборе метода построения модели, описывающей сопряженность ИМТ подростков с пищевыми и некоторыми непищевыми факторами, учитывался тип переменных и дизайн исследования (одномоментный срез). Предполагалось также, что каждое наблюдение является результатом независимых испытаний, образующих случайную выборку из генеральной совокупности.

В нашем случае зависимая переменная Y (ИМТ подростка) предположительно связана со многими независимыми переменными X_1, X_2, \dots, X_k (это пищевая ценность рациона, кратность питания в рабочие и выходные дни, коэффициент физической активности, ИМТ родителей, уровень образования родителей и т. д.). Y и X_k в нашем массиве данных являются непрерывными количественными переменными. К данным была применена процедура скользящего среднего для сглаживания случайных колебаний значений X и Y [27].

Все вышеизложенное определило выбор множественной линейной регрессии в качестве статистического метода для построения моделей.

Наиболее информативные предикторы были отобраны пошагово. Пошаговая процедура дает набор предикторов, которые обеспечивают приемлемое качество модели при минимальном количестве предикторов. Для учета взаимной коррелированности предикторов в модель были включены перекрестные члены.

Качество построенной модели характеризуется коэффициентом детерминации. Чем ближе R^2 к единице, тем меньше расчетные значения Y отличаются от экспериментальных.

Модели формирования ИМТ строились отдельно для юношей и девушек в силу различий в физиологии, пищевых паттернов, разного уровня физической активности и т. п.

Регрессионная модель взаимосвязи ИМТ юношей с показателями пищевой ценности, семейно-социальными и факторами генетической предрасположенности:

$$\text{ИМТ}_{\text{ю}} = -13,309 + [\text{Кол-во потребляемой пищи}] * 0,017 + [\text{Простые сахара}] * (-0,126) + [\text{ИМТ матери}] * 0,804 + [\text{Пищевые волокна}] * (-0,207) \quad (1)$$

$$R^2 = 0,86.$$

Регрессионная модель взаимосвязи ИМТ девушек с показателями пищевой ценности, семейно-социальными и генетически предрасположенными факторами:

$$\text{ИМТ}_{\text{д}} = 16,730 + [\text{ИМТ матери}] * 1,700 + [\text{Б:Ж}] * (-12,255) + [\text{Полисахариды}] * (-0,237) + [\text{Пищевые волокна} * \text{Полисахариды}] * 0,009 + [\text{Пищевые волокна}] * (-0,759) \quad (2)$$

$$R^2 = 0,91.$$

Коэффициенты регрессии перед всеми факторами, входящими в модель (1), и (2) являются статистически значимыми ($p < 0,01$).

Модель (2) имеет высокий коэффициент детерминации, $R^2 = 0,91$ (91 % дисперсии показателя ИМТ объясняется зависимостью от выбранных показателей, т. е. хорошо описывает фактические значения ИМТ).

На рис. 4 показана диаграмма рассеяния фактического/ожидаемого ИМТ девушек с учетом пищевой ценности и факторов семейной, социальной и генетической предрасположенности, которая является графическим представлением качества модели (2).

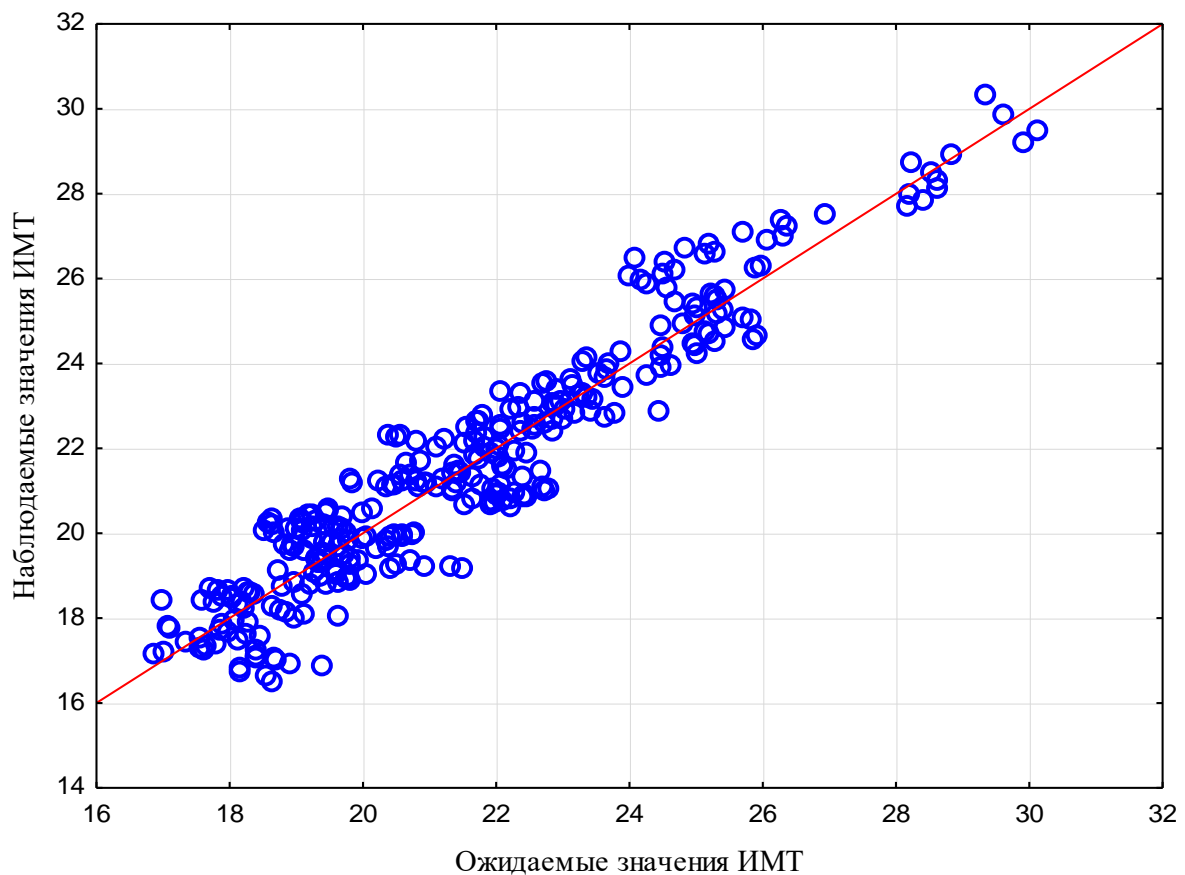


Рис. 4. Взаимосвязь наблюдаемых и рассчитанных по модели (2) значений ИМТ девушек

4. Заключение

Согласно принципу множественности моделей В. В. Налимова, «для объяснения и предсказания структуры и (или) поведения сложной системы возможно построение нескольких одинаково достоверных математических моделей» [28]. В настоящей работе с помощью комплекса статистических методов решена практическая задача эпидемиологии: построены модели, описывающие сопряженность ИМТ подростков с пищевыми и некоторыми непищевыми факторами; исследована распространенность дефицита массы тела, избыточной массы тела и ожирения среди подростков – учащихся колледжей. Результаты представлены в наглядной форме, доступной для специалистов – не математиков.

В предметном смысле результаты настоящего исследования позволяют сделать вывод о выявленных нарушениях режима и фактического питания подростков, что может негативно отразиться на их здоровье. Результаты исследования свидетельствуют о необходимости реализации профилактических мер по оптимизации питания в организованных коллективах и повышению уровня гигиенической грамотности обучающихся, их родителей, медицинских работников, педагогов и организаторов питания.

5. Список литературы

1. Огородникова, С. Ю. Методы визуализации данных в медико-биологических исследованиях / С. Ю. Огородникова, Е. Д. Константинова // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2022. – № 3(3). – С. 4–18. – DOI 10.56564/27825264_2022_3_4. – EDN KBPYUR.
2. Гланц, С. Медико-биологическая статистика. – Москва : Практика. 1998. – 459 с. – ISBN 5-89816-009-4.
3. Shoukri , M. M. Statistical methods for health sciences / M. M. Shoukri, C. A. Pause. – 2nd Edition. – CRC Press, 1998. – 384 p. – ISBN 978-0849310959.
4. Красько, О. В. Статистический анализ данных в медицинских исследованиях – Минск : Международный государственный экологический университет им. А. Д. Сахарова, 2014. – 127 с. – ISBN 978-985-551-096-4.
5. Hosmer, D. Applied Logistic Regression / D. Hosmer, S. Lemeshow. – 2nd Edition. – New York : Wiley, 2000. – 397 p. – ISBN 0-471-35632-8.
6. Тьюки, Дж. Анализ результатов наблюдений. – Москва : Мир, 1981. – 695 с.
7. Лучинин, А. С. Прогностические модели в медицине / А. С. Лучинин // Клиническая онкогематология. Фундаментальные исследования и клиническая практика. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 27–36. – DOI 10.21320/2500-2139-2023-16-1-27-36. – EDN UZEQZU.
8. Кузнецова, А. В. Преодоление проблемы «черного ящика» при использовании методов машинного обучения в медицине / А. В. Кузнецова, О. В. Сенько, Ю. О. Кузнецова // Врач и информационные технологии. – 2018. – № S1. – С. 74–80. – EDN YMKAOL.
9. Приказ министерства труда и социального развития Российской Федерации № 768 от 28.12.2021.
10. Afifi, A. A. Statistical Analysis: A Computer Oriented Approach / A. A. Afifi, S. P. Azen. – New York : Academic Press, 1972. – 366 p. – ISBN: 9780120444502.
11. Afifi, A. A. Computer-aided multivariate analysis / A. A. Afifi, S. May, V. Clark. – 4th Edition. – Chapman&Hall/CRC, 2003. – 512 p. – ISBN 978-1584883081.
12. Mosteller, F. Data analysis and regression. A second course in statistics / F. Mosteller, J. W. Tukey. – Addison-Westly Publishing Company, 1978. – 317 p. – ISBN 978-0201048544.
13. Fletcher, R. H. Clinical epidemiology: The essentials / R. H. Fletcher, S. W. Fletcher. – 5th Edition. – Lippincott Williams & Wilkins, 2012. – 272 p. – ISBN 978-1451144475.
14. Вараксин, А. Н. Статистические модели регрессионного типа в экологии и медицине: монография / А. Н. Вараксин; Уральский гос. технический ун-т, Ин-т пром. экологии УрО РАН. – Екатеринбург : Гошицкий, 2006. – 255 с. – ISBN 5-98829-005-1. – EDN QLNFZT.
15. Распространенность избыточной массы тела и ожирения у детей / А. Н. Мартинчик, К. Э. Лайкам, Н. А. Козырева [и др.] // Вопросы питания. – 2022. – Т. 91, № 3(541). – С. 64–72. – DOI 10.33029/0042-8833-2022-91-3-64-72. – EDN VAQOJC.
16. Карпова, О. Б. Распространенность ожирения подростков в мире и Российской Федерации в 2012–2018 гг. / О. Б. Карпова, В. О. Щепин, А. А. Загоруйченко // Гигиена и санитария. – 2021. – Т. 100, № 4. – С. 365–372. – DOI 10.47470/0016-9900-2021-100-4-365-372. – EDN SRGLAX.
17. Vitamin D deficiency in childhood obesity is associated with high levels of circulating inflammatory mediators, and low insulin sensitivity / M. Reyman, A. A. Verrijn Stuart, M. van Summeren [et al.] // International Journal of Obesity. – 2014. – Vol. 38, No. 1. – P. 46–52. – DOI [10.1038/ijo.2013.75](https://doi.org/10.1038/ijo.2013.75).
18. Кинаш, М. И. Жирорастворимые витамины и иммунодефицитные состояния: механизмы влияния и возможности использования / М. И. Кинаш, О. Р. Боярчук // Вопросы питания. – 2020. – Т. 89, № 3. – С. 22–32. – DOI 10.24411/0042-8833-2020-10026. – EDN JZZZCV.
19. Пырьева, Е. А. Роль и место пищевых волокон в структуре питания населения / Е. А. Пырьева, А. И. Сафронова // Вопросы питания. – 2019. – Т. 88, № 6. – С. 5–11. – DOI 10.24411/0042-8833-2019-10059. – EDN TMNZUL.
20. Роль оптимального питания в профилактике сердечно-сосудистых заболеваний / Н. С. Сметнева, А. В. Погожева, Ю. Л. Васильев [и др.] // Вопросы питания. – 2020. – Т. 89, № 3. – С. 114–124. – DOI 10.24411/0042-8833-2020-10035. – EDN GCEZJJ.
21. Dietary Determinants of Metabolic Syndrome Parameters Differ by Gender in College Students / S. Saltzgeber, A. Nielson, H. Costello [et al.] // Nutrients. – 2019. – Vol. 11, No. 12. – DOI 10.3390/nu11122892.

22. Нутрициология и клиническая диетология: Национальное руководство / А. Л. Абалина, С. Е. Акользина, И. В. Аксенов [и др.]. – 2-е издание. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2021. – 1008 с. – (Национальные руководства). – ISBN 978-5-9704-6280-5. – DOI 10.33029/9704-6280-5-NKD-2021-1-1008. – EDN RLLIOP.
23. World Health Organization. *WHO child growth standards: training course on child growth assessment*, World Health Organization, 2021. Available online: <https://www.who.int/tools/growth-reference-data-for-5to19-years/indicators/bmi-for-age> (accessed on 8 August 2023).
24. Siegel, A. F. *Practical Business Statistics* / A. F. Siegel. – 7th Edition. – Academic Press, 2016. – 642 p. – ISBN 978-0128042502.
25. Parent-Offspring Associations in Body Composition: Findings From the Southampton Women's Survey Prospective Cohort Study / R. J. Moon, S. D'Angelo, C. R. Holroyd [et al.] // *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. – 2023. – dgad128. – DOI [10.1210/clinem/dgad128](https://doi.org/10.1210/clinem/dgad128).
26. Dolton, P. The intergenerational transmission of body mass index across countries / P. Dolton, M. Xiao // *Economics & Human Biology*. – 2017. – Vol. 24. – P. 140–152. – DOI 10.1016/j.ehb.2016.11.005.
27. Применение методов скользящего среднего для построения регрессионных моделей в медико-экологических исследованиях / А. Н. Вараксин, Ю. В. Шалаумова, Т. А. Маслакова [и др.] // *Экологические системы и приборы*. – 2020. – № 6. – С. 12–21. – DOI 10.25791/esip.06.2020.1159. – EDN XTBFVAV.
28. *Налимов, В. В. Теория эксперимента*. – Москва : Наука, 1971. – 208 с.

Сведения об авторах:

Константинова Екатерина Даниловна, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией математического моделирования в экологии и медицине Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: K_Konst@ecko.uran.ru

Маслакова Татьяна Анатольевна, к. ф.-м. н., научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Вараксин Анатолий Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Делец Светлана Семеновна, ассистент кафедры общей гигиены Южно-Уральского государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО ЮУГМУ Минздрава России), г. Челябинск, Россия.

APPROACHES TO HEALTH DATA STATISTICAL MODELING ON THE EXAMPLE OF ASSESSMENT OF THE ACTUAL NUTRITION OF ADOLESCENTS

E.D. Konstantinova¹, T.A. Maslakova¹, A.N. Varaksin¹, S.S. Delets²

¹ Institute of Industrial Ecology, Ekaterinburg, Russia

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "South-Ural State Medical University" of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Chelyabinsk, Russia

The issues of taking into account the peculiarities of working with biomedical data when solving epidemiological problems using statistical methods are discussed in this method paper. The importance of the correct choice of statistical methods for the analysis of MBD, as well as a visual graphical representation of experimental numerical results from the field of epidemiology, is emphasized. The MBD array was retrospectively analyzed, containing 809 cases and 185 variables of various types. As a method of analysis, multiple linear regression was chosen using a moving average approach. The practical problem of constructing models that describe the association of adolescent BMI with nutritional and some non-nutritive factors has been solved. The prevalence of underweight, overweight, and obesity among adolescent college students has been studied. The results of this study may be required in the development of preventive measures to optimize nutrition in organized groups, and will also help to increase the level of hygiene literacy of the interested circle of people.

Key words: statistical modeling; biomedical data; multiple linear regression; actual nutrition of adolescents.

References

1. Ogorodnikova, S. Y. Data visualization methods in biomedical research / S. Y. Ogorodnikova, E. D. Konstantinova // Research trajectory – man, nature, technology. – 2022. – Vol. 3, No. 3. – P. 4–18. – DOI 10.56564/27825264_2022_3_4. – EDN KBPYR. [in Russian].
2. Glantz S. Medico-biological statistics. – Moscow : Practice. 1998. – 459 p. – ISBN 5-89816-009-4 [in Russian].
3. Shoukri, M. M. Statistical methods for health sciences / M. M. Shoukri, C. A. Pause. – 2nd Edition. – CRC Press, 1998. – 384 p. – ISBN 978-0849310959.
4. Krasko, O. V. Statistical analysis of data in medical research – Minsk : International state ecological university named after A.D. Sakharov, 2014. – 127 p. – ISBN 978-985-551-096-4 [in Russian].
5. Hosmer, D. Applied Logistic Regression / D. Hosmer, S. Lemeshow. – 2nd Edition. – New York : Wiley, 2000. – 397 p. – ISBN 0-471-35632-8.
6. Tukey, J. Analysis of observational results. – Moscow : Mir, 1981. – 695 p. [in Russian]
7. Luchinin, A. S. Prognostic models in medicine / A. S. Luchinin // Clinical oncohematology. Basic research and clinical practice. – 2023. – Vol. 16, No. 1. – P. 27–36. – DOI 10.21320/2500-2139-2023-16-1-27-36. – EDN UZEQZU [in Russian].
8. Kuznetsova, A. V. Overcoming the "black box" problem when using machine learning methods in medicine / A. V. Kuznetsova, O. V. Senko, Yu. O. Kuznetsova // Doctor and information technology. – 2018. – No. S1. – P. 74–80. – EDN YMKAOL. [in Russian]
9. Order of the Ministry of Labor and Social Development of the Russian Federation No. 768 dated 12.28.2021 [in Russian].
10. Afifi A. A. Statistical Analysis: A Computer Oriented Approach / A. A. Afifi, S. P. Azen. – New York : Academic Press, 1972. – 366 p. – ISBN: 9780120444502.
11. Afifi, A. A. Computer-aided multivariate analysis / A. A. Afifi, S. May, V. Clark. – 4th Edition. – Chapman&Hall/CRC, 2003. – 512 p. – ISBN 978-1584883081.
12. Mosteller, F. Data analysis and regression. A second course in statistics / F. Mosteller, J. W. Tukey. – Addison-Westly Publishing Company, 1978. – 317 p. – ISBN 978-0201048544.

13. *Fletcher, R. H.* Clinical epidemiology: The essentials / R. H. Fletcher, S. W. Fletcher. – 5th Edition. – Lippincott Williams & Wilkins, 2012. – 272 p. – ISBN 978-1451144475.
14. *Varaksin, A. N.* Statistical models of regression type in ecology and medicine: monograph / A. N. Varaksin; Ural State Technical University, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – Ekaterinburg : Goshchitsky, 2006. – 255 p. – ISBN 5-98829-005-1. – EDN QLNFTZ [in Russian].
15. The prevalence of overweight and obesity in children / A. N. Martinchik, K. E. Laikam, N. A. Kozyreva [et al.] // *Problems of Nutrition*. – 2022. – Vol. 91, No. 3 (541). – P. 64–72. – DOI 10.33029/0042-8833-2022-91-3-64-72. – EDN VAQOJC [in Russian].
16. *Karpova, O. B.* The prevalence of adolescent obesity in the world and the Russian Federation in 2012-2018 / O. B. Karpova, V. O. Shchepin, A. A. Zagoruychenko // *Hygiene and Sanitation*. – 2021. – Vol. 100. – No. 4. – P. 365–372. – DOI 10.47470/0016-9900-2021-100-4-365-372. – EDN SRGLAX [in Russian].
17. Vitamin D deficiency in childhood obesity is associated with high levels of circulating inflammatory mediators, and low insulin sensitivity / M. Reyman, A. A. Verrijn Stuart, M. van Summeren [et al.] // *International Journal of Obesity*. – 2014. – Vol. 38, No. 1. – P. 46–52. – DOI [10.1038/ijo.2013.75](https://doi.org/10.1038/ijo.2013.75).
18. *Kinash, M. I.* Fat-soluble vitamins and immunodeficiency states: mechanisms of influence and possibilities of use / M. I. Kinash, O. R. Boyarchuk // *Problems of Nutrition*. – 2020. – Vol. 89, No. 3. – P. 22–32. – DOI 10.24411/0042-8833-2020-10026. – EDN JZZZCV [in Russian].
19. *Pyr'eva, E. A.* The role and place of dietary fiber in the structure of nutrition of the population / E. A. Pyr'eva, A. I. Safronova // *Problems of Nutrition*. – 2019. – Vol. 88, No. 6. – P. 5–11. – DOI 10.24411/0042-8833-2019-10059. – EDN TMNZUL, [in Russian].
20. The role of optimal nutrition in the prevention of cardiovascular diseases / N. S. Smetneva, A. V. Pogozheva, Yu. L. Vasiliev [et al.] // *Problems of Nutrition*. – 2020. – Vol. 89, No. 3. – P. 114–124. – DOI 10.24411/0042-8833-2020-10035. – EDN GCEZJJ [in Russian].
21. Dietary Determinants of Metabolic Syndrome Parameters Differ by Gender in College Students / S. Saltzgeber, A. Nielson, H. Costello [et al.] // *Nutrients*. – 2019. – Vol. 11, No. 12. – DOI 10.3390/nu11122892.
22. Nutrition and clinical nutrition: national guidelines / A. L. Abalina, S. E. Akolzina, I. V. Aksenov [et al.]. – 2th Edition. – Moscow : Limited Liability Company Publishing Group "GEOTAR-Media", 2021. – 1008 p. – (National guidelines). – ISBN 978-5-9704-6280-5. – DOI 10.33029/9704-6280-5-NKD-2021-1-1008. – EDN RLLIOP [in Russian].
23. World Health Organization. *WHO child growth standards: training course on child growth assessment*, World Health Organization, 2021. Available online: <https://www.who.int/tools/growth-reference-data-for-5to19-years/indicators/bmi-for-age> (accessed on 8 August 2023).
24. *Siegel, A.F.* Practical Business Statistics / A. F. Siegel. – 7th Edition. – Academic Press, 2016. – 642 p. – ISBN 978-0128042502.
25. Parent-Offspring Associations in Body Composition: Findings From the Southampton Women's Survey Prospective Cohort Study / R. J. Moon, S. D'Angelo, C. R. Holroyd [et al.] // *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. – 2023. – dgad128. – DOI [10.1210/clinem/dgad128](https://doi.org/10.1210/clinem/dgad128).
26. *Dolton, P.* The intergenerational transmission of body mass index across countries / P. Dolton, M. Xiao // *Economics & Human Biology*. – 2017. – Vol. 24. – P. 140–152. – DOI 10.1016/j.ehb.2016.11.005.
27. Application of moving average methods for constructing regression models in medical and environmental studies / A. N. Varaksin, Yu. V. Shalaumova, T. A. Maslakova [et al.] // *Ecological systems and devices*. – 2020. – No. 6. – P. 12–21. – DOI 10.25791/esip.06.2020.1159. – EDN XTBFVAV [in Russian].
28. *Nalimov, V.V.* Theory of experiment. – Moscow : Nauka, 1971. – 208 p. [in Russian].

РАДОНОВОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

Д. Д. Десятов¹, А. Д. Онищенко¹, А. В. Васильев¹, А. В. Климшин², В. О. Никитенко³,
А. Е. Самбуров³, М. В. Жуковский¹

¹ *Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

² *ООО «НПФ «Резольвента», г. Екатеринбург, Россия*

³ *Белоярская АЭС, г. Заречный, Россия*

В статье рассмотрены результаты выборочного радонового обследования помещений Белоярской АЭС. Выполнено 1 153 краткосрочных измерения эквивалентной равновесной объемной активности и 235 измерений интегрирующими трековыми детекторами. Среднее значение ЭРОА радона в помещениях Белоярской АЭС составило 18 Бк/м³, ЭРОА торона – 1,7 Бк/м³.

Ключевые слова: природное облучение; радон; объемная активность; эквивалентная равновесная объемная активность.

1. Введение

В последние несколько десятилетий большое внимание уделяется радиационной безопасности населения, персонала и окружающей среды. Важную роль в радиационном воздействии на персонал и население в помещениях зданий играют природные источники облучения. Так, в России вклад природных источников ионизирующего излучения (ИИИ) в суммарную дозу составляет 86 % [1]. К таким источникам относится газ радон, который повсеместно присутствует в атмосфере, накапливается в зданиях и является наиболее важным с точки зрения влияния на человека природным источником облучения [2–4]. Его негативное влияние связано с возможностью индуцирования рака легкого и преждевременной смертью от этого заболевания. Особое внимание к проблеме защиты населения от облучения радоном в жилищах связано с тем, что среди всех источников природного происхождения радон вносит наибольший вклад в облучение населения [5]. Информация об объемных активностях радона на радиационно опасных промышленных объектах, таких как АЭС, также представляет значительный интерес. На таких объектах наличие радона в атмосфере может стать дополнительным фактором воздействия на персонал наряду с техногенными источниками ионизирующего излучения. Требования к защите от природного облучения в производственных условиях, в т. ч. от облучения радоном, отражены в п. 4.2 НРБ-99/2009 [6].

Основные пути поступления радона на промышленных объектах – грунтовое основание и ограждающие конструкции зданий [7]. Различные факторы, такие как пористая среда грунта, строительные материалы и щели, трещины и разломы в конструкциях, могут способствовать поступлению радона. Движущей силой переноса радона является разность концентраций и давлений между внутренним объемом здания и наружной атмосферой в случаях диффузионного и конвективного поступления соответственно. Вентиляция помещений играет важную роль в разбавлении воздуха помещений атмосферным воздухом с низкой объемной активностью радона.

В настоящей статье рассмотрены результаты выборочного радонового обследования помещений Белоярской АЭС. Цель исследования – проанализировать влияние различных факторов на величину и вариабельность накопления радона в производственных помещениях крупного промышленного объекта.

2. Материалы и методы

Радоновое обследование было проведено на территории Белоярской атомной

станции в 2019 и 2022 гг. Количество обследованных зданий на территории промплощадки энергоблока № 4 Белоярской атомной станции составило 45 зданий, на территории промплощадки № 1–3 энергоблоков – 33 здания.

Обследование включало измерения мощности амбиентной эквивалентной дозы гамма-излучения (МАЭД) и измерения объемной активности (ОА) радона в производственных помещениях. Гамма-съёмка производилась путем обхода помещений здания по свободному маршруту по центру помещений при непрерывном наблюдении за показаниями поискового радиометра. Объем контроля был выбран следующим образом:

- в сооружениях производственного назначения (при числе помещений для постоянного пребывания людей до 30) оптимальное число помещений, где проводились измерения, составило не менее 25 % от общего числа;

- в сооружениях производственного назначения (при числе помещений для постоянного пребывания людей до 100) оптимальное число помещений, где проводились измерения, составило не менее 25 % от общего числа;

- в сооружениях производственного назначения (при числе помещений для постоянного пребывания людей свыше 100 и до 1 000) оптимальное число помещений, где проводились измерения, составило не менее 5 % от общего числа, но не менее 20;

- при большем количестве помещений производственного назначения для постоянного пребывания людей оптимальное число помещений, где проводились измерения, составило не менее 50.

Число и расположение подлежащих обследованию помещений выбиралось исходя из типа помещений, имеющих различное функциональное назначение. При этом наибольшую долю от всех выбранных помещений составляли те, в которых люди проводят наибольшее количество времени.

Краткосрочные измерения в помещении выполнялись в точке, расположенной в его центре на высоте 1 м от пола. При размерах более 100 м² количество точек увеличивалось из расчета одно измерение на каждые 100–200 м².

Для повышения эффективности измерений ОА радона использовалось два режима. Выбор режима измерений определялся по принадлежности помещений заданной группе со стабильным «А» и нестабильным характером воздухообмена «С» соответственно, а также в зависимости от значений ОА радона в помещениях, полученных в краткосрочном режиме. Данные о принадлежности помещений соответствующим группам были определены в ходе обследований в рамках работ.

В помещениях групп «А» и «С» проводились краткосрочные измерения ОА радона. Краткосрочные измерения – непрерывные измерения (или пробоотбор с последующим измерением) продолжительностью от нескольких минут до одного часа. При измерениях был использован радиометр аэрозолей РАА-10. Для более точной оценки все обследуемые помещения предварительно выдерживались с закрытыми окнами и дверьми для достижения стабильного на период измерения воздухообмена. Всего было выполнено 246 краткосрочных измерений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в помещениях энергоблоков № 1, 2; 455 измерений в помещениях энергоблока № 3; 452 измерения в помещениях энергоблока № 4.

В помещениях группы «С» с нестабильным характером воздухообмена проводились краткосрочные измерения, а также долгосрочные (интегрирующие) измерения. Долгосрочные измерения – непрерывные измерения, продолжительность которых составила не менее 2 месяцев. Измерения выполнялись с помощью радоновых экспозиметров «РЭИ-4» (рис. 1) для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом «ТРЕК-РЭИ-1М». Всего выполнено 235 долгосрочных измерений ОА (52 измерения в помещениях энергоблоков № 1, 2; 88 измерений в помещениях энергоблока № 3; 95 измерений в помещениях энергоблока № 4). Период измерений (сентябрь – ноябрь) выбирался так, чтобы средняя

температура примерно соответствовала среднегодовой температуре, которая в этом регионе составляет приблизительно 4–7 °С, поэтому сезонная нормализация не проводилась.

Отбор проб воздуха и установка интегральных средств измерений ОА радона производились на высоте 1–2 м от пола, не ближе 0,5 м от стен помещения. При размерах обследуемого помещения более 100 м² количество измерений увеличивалось из расчета одно измерение на каждые 100–200 м².



Рис. 1. Радоновый экспозиметр «РЭИ-4» с трековым детектором LR-115

В многоэтажных производственных зданиях число контролируемых помещений включало помещения на каждом этаже. Процент помещений на соответствующих этажах зданий показан на рис. 2. Почти половина измерений проведена в подвальных помещениях и в помещениях, находящихся на первом этаже обследуемых зданий.

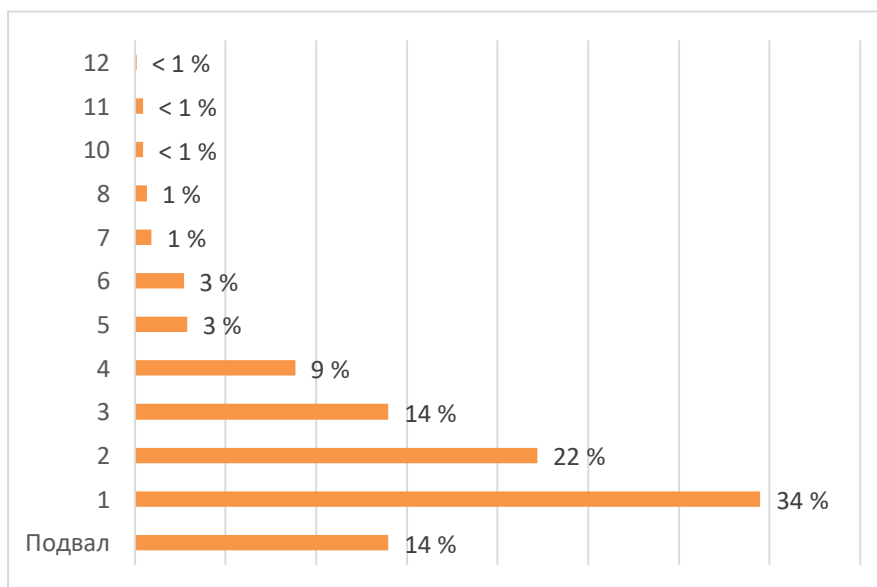


Рис. 2. Процент исследуемых помещений на соответствующих этажах зданий

3. Результаты

По результатам краткосрочных измерений (всего 1 153 измерения) было получено среднее арифметическое ЭРОА радона – 18 Бк/м³, среднее геометрическое – 8 Бк/м³, стандартное отклонение логарифма $\sigma_{LN}=0,94$. Диапазон значений ЭРОА торона, полученный в режиме краткосрочных измерений, составил

3,0–9,0 Бк/м³, притом в 94 % помещений результаты оказались меньшими нижнего предела измерений (НПИ) прибора. Коэффициент равновесия радона составил от 0,39 до 0,86 при среднем значении 0,62.

В помещениях группы «С» с нестабильным характером воздухообмена были также проведены долгосрочные (интегрирующие) измерения. На основании совместного анализа результатов (235 долгосрочных измерений ОА в помещениях зданий всех четырех энергоблоков Белоярской АЭС, 20 % от всей выборки) для помещений группы «С» было получено характерное логнормальное распределение ОА радона для помещений, в которых могут ожидать значения, превышающие среднее значение ЭРОА радона 18 Бк/м³, полученное в ходе краткосрочных измерений (рис. 3). Параметры распределения в данной выборке помещений: среднее арифметическое значение ОА радона в выборке составило 170 Бк/м³, среднее геометрическое – 72 Бк/м³, стандартное отклонение логарифма $\sigma_{LN}=1,28$.

Таким образом, прогнозируемая доля помещений с ЭРОА радона выше 300 Бк/м³ (с учетом коэффициента равновесия 0,62) составит не более 1 % по всем помещениям Белоярской АЭС.

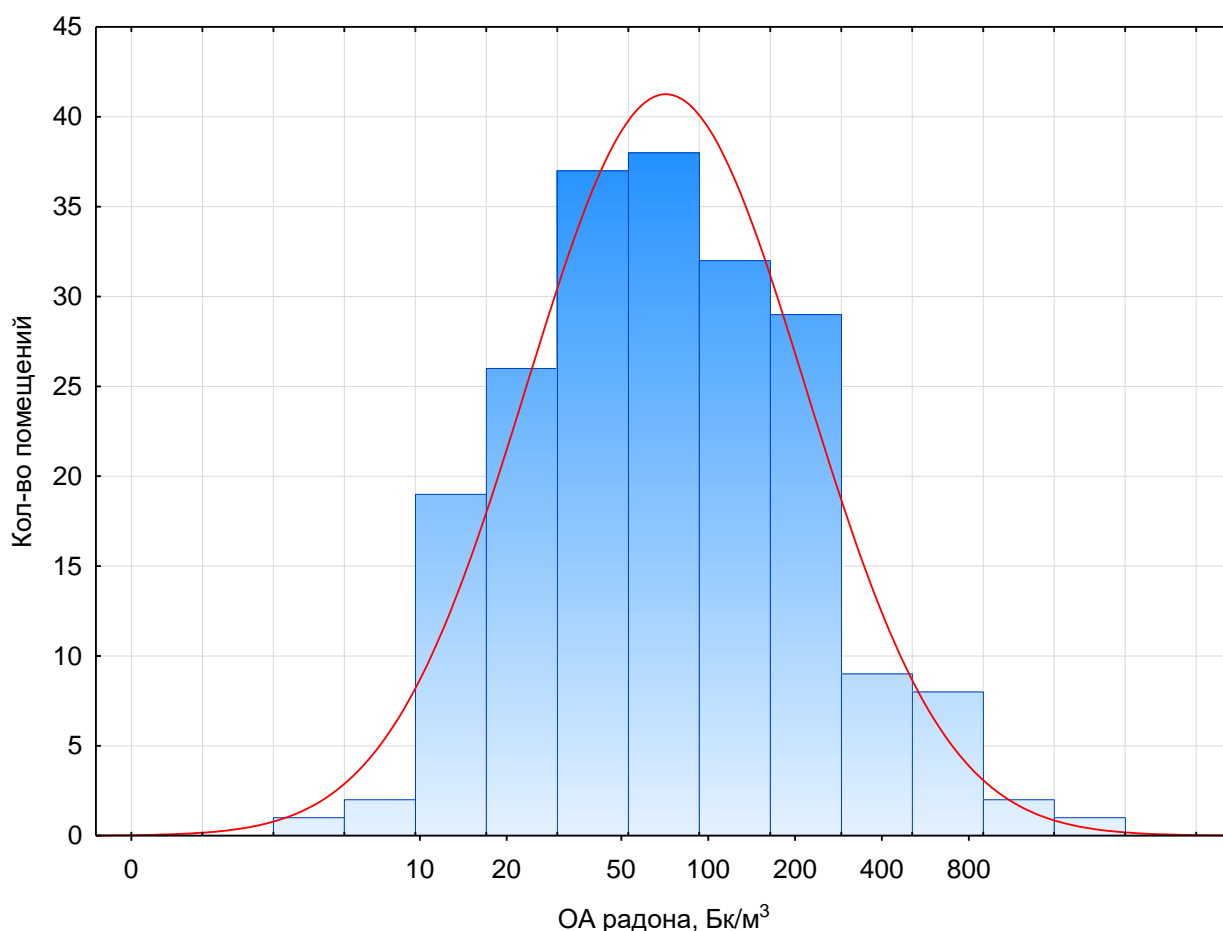


Рис. 3. Логнормальное распределение ОА радона в помещениях зданий Белоярской АЭС

Был проведен анализ влияния типа вентиляции помещений на значения ОА радона. На рис. 4 видно, что отсутствие принудительной вентиляции в помещении негативно сказывается на уровне ОА радона в помещении.

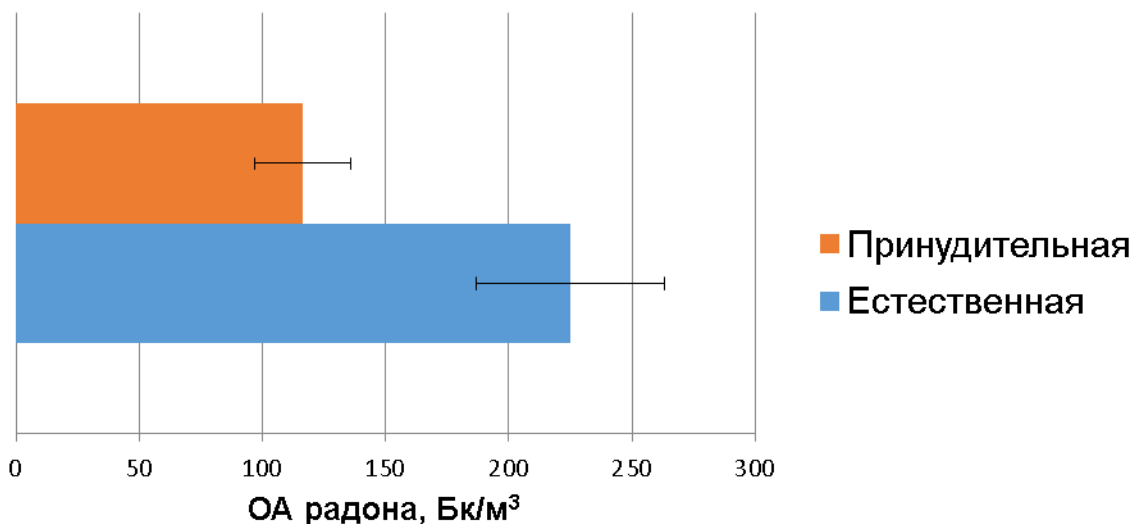


Рис. 4. Влияние типа вентиляции помещений на средние значения ОА радона.

4. Выводы

1. Проведено первичное обследование радиационной обстановки, обусловленной природными источниками ионизирующего излучения на рабочих местах Белоярской АЭС. На рабочих местах постоянного и временного пребывания персонала Белоярской АЭС проведены измерения объемной активности радона интегрирующими трековыми детекторами и краткосрочные измерения ОА радона. Выполнено 1 153 краткосрочных измерения эквивалентной равновесной объемной активности и 235 измерений интегрирующими трековыми детекторами. Согласно п. 4.2 «НРБ-99/2009» ЭРОА радона в воздухе помещений в течение года не должна превышать 310 Бк/м³.

2. Среднее значение ЭРОА радона в помещениях Белоярской АЭС составило 18 Бк/м³. Также получено характерное логнормальное распределение ОА радона для тех помещений Белоярской АЭС, где могут создаваться условия для повышенного накопления радона. Получено, что прогнозируемая доля помещений с ЭРОА радона выше 310 Бк/м³ (с учетом коэффициента равновесия 0,62) составит не более 1 % по всем помещениям Белоярской АЭС.

3. При предварительном анализе ситуации может быть сделан вывод о том, что в технологических процессах, характерных для Белоярской АЭС, отсутствуют операции, приводящие к появлению в атмосфере пыли с высоким содержанием природных радионуклидов (радиоактивные ряды распада ²³⁸U и ²³²Th). Мощность дозы внешнего излучения, составной частью которого является и внешнее излучение от природных источников, контролируется как на территории Белоярской АЭС, так и в пределах санитарно-защитной зоны в соответствии с регламентом радиационного контроля. Единственными природными источниками радиационного воздействия на персонал, требующими дополнительного изучения, являются только изотопы радона ²²²Rn и ²²⁰Rn, а также их дочерние продукты распада.

5. Список литературы

1. *Онищенко, Г. Г.* Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе / Г. Г. Онищенко, И. К. Романович // Радиационная гигиена. – 2014. – 7(4). – 5–22.
2. *Васильев, А. В.* Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении / А. В. Васильев, М. В. Жуковский // АНРИ. – 2015. – № 2(81). – С. 42–47.
3. Study of the zooplankton community as an indicator of the trophic status of reservoirs of the Chelyabinsk Region, Russia / I. V. Mashkova, A. M. Kostriyko, V. V. Trofimenko, A. I. Slavnaya

// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Macao, China, 16–19 July 2019. – Macao, China: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012013. – EDN RKKCCW.

4. SSG32. Specific Safety Guide. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. – Vienna: IAEA, 2015. – 112 с.
5. Обзор рекомендаций МАГАТЭ по защите от облучения радоном в жилищах / И. В. Ярмошенко, Г. П. Малиновский, А. В. Васильев, М. В. Жуковский // АНРИ. – 2015. – № 4(83). – С. 22–28.
6. Нормы радиационной безопасности. СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009): постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47.
7. Влияние геогенных и антропогенных факторов на процессы поступления и накопления радона в зданиях (на примере населенных пунктов, расположенных на реке Тече) / И. В. Ярмошенко, А. В. Васильев, Г. П. Малиновский, А. А. Селезнев // АНРИ. – 2017. – № 3(90). – С. 62–70.

Сведения об авторах:

Десятов Денис Дмитриевич, инженер-исследователь Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: desyatovdenis1995@gmail.com.

Онищенко Александра Дмитриевна, к. б. н., ст. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Васильев Алексей Владимирович, к. т. н., заведующий лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Климшин Алексей Валерьевич, к. т. н., директор ООО «НПФ «Резольвента», Екатеринбург, Россия.

Никитенко Виталий Олегович, руководитель группы индивидуального дозиметрического контроля отдела радиационной безопасности БАЭС, г. Заречный, Россия.

Самбуров Анатолий Евгеньевич, руководитель группы радиационного контроля блоков 1,2 отдела радиационной безопасности БАЭС, г. Заречный, Россия.

Жуковский Михаил Владимирович, д. т. н., г. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

RADON ASSESMENT OF BELOYARSK NPP

D. D. Desyatov¹, A. D. Onischenko¹, A. V. Vasiliev¹, A. V. Klymshin², V. O. Nikitenko³,
A. E. Samburov³, M. V. Zhukovsky¹

¹ Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia

² NPF «Rezolventa», Ekaterinburg, Russia

³ Beloyarsk NPP, Zarechny, Russia

The results of selective radon examination of the Beloyarsk NPP compartments are considered. 1 153 short-term measurements of equivalent equilibrium volumetric activity and 235 measurements by integrating track detectors were performed. The mean value of radon and thoron EEVA in the Beloyarsk NPP compartments is 18 Bq/m³ and 1,7 Br/m³ respectively.

Key words: natural irradiation; radon; volume activity; equivalent equilibrium volumetric activity.

References

1. Onishenko, G. G. Current trends of the provision for radiation safety of the population of the Russian Federation / G. G. Onishenko, I. K. Romanovich // Radiation Hygiene. – 2014. – 7(4). – P. 5–22.
2. Vasilyev, A. V. The Temporal Variations of Radon Concentrations in the Rooms / A. V. Vasilyev, M. V. Zhukovsky // ANRI. – 2015. – № 2(81). – P. 42–47.
3. Study of the zooplankton community as an indicator of the trophic status of reservoirs of the Chelyabinsk Region, Russia / I. V. Mashkova, A. M. Kostriyko, V. V. Trofimenko, A. I. Slavnaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Macao, China, 16–19 July 2019. – Macao, China: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012013. – EDN RKKCCW.
4. SSG32. Specific Safety Guide. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. – Vienna: IAEA, 2015. – 112 p.
5. Review of the IAEA recommendations on protection against exposure to indoor radon / I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky, A. V. Vasilyev, M. B. Жуковский // ANRI. – 2015. – № 4(83). – P. 22–28.
6. Radiation safety standards. SanPiN 2.6.1.2523-09 (NRB-99/2009): Resolution No. 47 dated 07.07.2009 of the Chief medical officer of the Russian Federation.
7. Influence of Geogenic and Anthropogenic Factors on Indoor Radon Entry and Accumulation in the Techa River Region / I. V. Yarmoshenko, A. V. Vasilyev, G. P. Malinovsky, A. A. Seleznev // ANRI. – 2017. – № 3(90). – P. 62–70.

ИСТОРИЯ НАУКИ О ПРОБЛЕМЕ АНТРОПОЦЕНА И ДЕКОНСТРУКЦИИ ПРИРОДЫ

Ю. С. Шипицына

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

Статья посвящена проблеме осмысления антропоцена в междисциплинарном пространстве истории науки. Автор предлагает читателю обзор ключевых текстов по истории науки и об экологическом кризисе, среди которых работы Кэролин Мерчант, Бруно Латюра, Лоррейн Дастон, Мишеля Серра, Тимоти Мортон и Донны Харауэй. На примере этих исследований автор показывает, сколь высокую ценность имеет методология и накопленный опыт истории науки. В заключение автор подчеркивает познавательные возможности этого направления в качестве пространства научной рефлексии и поля для диалога о современных вызовах антропоцена и экологических проблемах. Особенное внимание уделяется понятию «природа», его исторической изменчивости и богатству смыслов.

Ключевые слова: антропоцен; экологическое сознание; история науки; Кэролин Мерчант; Бруно Латур; Лоррейн Дастон; Мишель Серр; Тимоти Мортон; Донна Харауэй.

1. Введение

Вопрос о влиянии технологий на окружающую среду – всегда вопрос политический. «История технологий от топоров каменного века до атомных бомб, от долбленых ложек до супертанкеров, от садоводства до генной инженерии – это история все возрастающей способности человека управлять природой», – писал Дэниел Хедрик [10, с. 15]. Идеи власти над природой – знания-власти, ее роли в социальных отношениях, в частности тому, как общество отрефлексирует проблемы влияния технологий на окружающую среду, посвящены исследования многих современных ученых – авторов философии экологизма.

Мостиком между программными манифестами теоретиков экологического активизма и эмпирическими выкладками ученых-экологов становятся исторические исследования генезиса научных знаний и технологий. История науки в современном дискурсивном пространстве, говоря простым языком, много на себя берет. Кризис антропоцена¹ и коллапс экспертного знания в эпоху постистины² подталкивают историков к переосмыслению науки как существующего набора конвенций, оформленного в мировоззрение и одобренного «коллегиальным рецензированием», каким предстает наука в концепции «парадигмы» Томаса Куна, наследниками коей по-прежнему ощущает себя большинство современных ученых [8, с. 17].

Кун не первый и не единственный, кто высказывал идею о революционном характере смены парадигм в науке. Однако он обосновывал этот подход как естественно (и единственно) верный. Широкое принятие точки зрения Куна – следствие высокой популярности его работы «Структура научных революций» (1962), а также ставшего реперной точкой историографии диспута о природе науки с Карлом Поппером, состоявшегося в июле 1965 г. в Лондоне. Любопытные перипетии этого

¹ Антропоцен (англ. anthropocene) – эпоха с высоким уровнем человеческой активности, воздействующей на природу и играющей существенную роль в экосистеме (здесь и далее прим. автора). Подробнее о термине см. работы Брайдотти и Мортон [1, 4, 5].

² Постистина (англ. post-truth) – социальный порядок, для которого характерна приостановка действия традиционной посылки об общей реальности, а значит, и понимания общих условий истины, которые диктуются или создаются волевым актом группы людей (ученых, политиков и др.). Подробнее см. работу Фуллера «Постправда. Знание как борьба за власть» (пер. на рус. яз. в 2021 г., оригинальное издание – 2018 г.) ([9]).

диспута и анализ его последствий изложены в работах Стива Фуллера, одного из ярких представителей социальной эпистемологии [8]. Исторические обстоятельства дисциплинарного становления истории науки – важная, нужная, но все-таки, как это принято говорить, совсем другая история.

Цель данной статьи – показать роль исследований по истории науки в контексте кризиса антропоцена. Выбор исследований, о которых далее пойдет речь, – следствие стремления автора пойти по пути не обобщения, но углубления проблематизации. Охваченные общим беспокойством об изменении видового, правового и морального статуса человека в мире в не меньшей степени, чем последствиями воздействия человека на природный мир, историки, социологи и философы науки объединяются в поиске альтернативных способов взаимодействия человека с окружающей средой и его отношения к знанию об этой среде. И в этом поиске новых подходов они неизбежно обращаются к прошлому науки, реконструируя тот или иной эпизод истории познавательных практик, теорий и методов.

2. Материалы и методы

История науки – междисциплинарное предприятие. Не только потому, что средствами гуманитарной дисциплины (истории) препарируются судьбы естественно-научных и математических дисциплин и академических проектов. Не только потому, что история науки занята поиском решений общенаучных проблем, касающихся методов, институций, этики и др. История науки интегрирована в науку, как и любое другое дисциплинарное направление, и, чтобы иметь право голоса, следует тем же самым стандартам академической культуры. При этом история науки упражняется в острашении собственных практик, чтобы иметь возможность взглянуть на них со стороны, в этой транgressии по отношению к пределам научного дискурса, чтобы его же собственными средствами дать ему описание. В этом смысле история науки (лучшие ее образцы) – и трансдисциплинарное, и наддисциплинарное предприятие. Именно эта черта превращает историю науки в доступное и более или менее подготовленное пространство для диалога об опасностях антропоцентризма и возможностях постгуманистической теории [1], экологическом сознании [4, 5], ситуативном знании [9] и других ценных идеях, призванных эти опасности минимизировать или вовсе предотвратить. Деконструкция понятия «природа» – одна из таких идей. В отношении методологических подходов для истории науки особенно значимы принципы историзма, исследовательской рефлексии, критической теории и интеграции результатов и методов тех наук, которые оказываются в центре внимания историка.

3. Результаты

В работах Кэролин Мерчант, Розы Брайдотти, Лоррейн Дагстон, Донны Харауэй, Тимоти Мортон, Мишеля Серра и Бруно Латура с разных позиций исследуются составляющие антропоцена – такой «биогенетической эпохи», «когда человек стал геологической силой, способной повлиять на всю жизнь на нашей планете» [1, с.17], а само понятие «человек» оказалось разрушено [1, с.18]. Все авторы так или иначе затрагивают проблему семантической трансформации понятия «природа».

Так, Кэролин Мерчант в книге «Смерть природы: женщины, экология и научная революция»³ с точки зрения гендерных проблем рассматривает традиционное для многих обществ и эпох сближение природы и женщины. И латинское *natura*, и греческое *physis* – существительные женского рода. В Средние века и Новое время романские языки перенимают это «женское» словообразование и продолжают традицию персонификации природы как женщины [3, с. 192]. Это «древнее представление о природе как кормящей матери соединяет женскую историю с

³ На рус. яз. переведен фрагмент, опубликованный в журнале «Логос», оригинальное издание – 1980 г.

историей окружающей среды и экологических изменений», и побуждает историка «изучить ценности, ассоциируемые с образами женщин и природы в их связи с формированием современного мира, а также их влияние на наши жизни сегодня» [3, с. 194, 195]. Мерчант особое значение придает «органической космологии», подвергнутой забвению с распространением механистического мировоззрения в эпоху Бэкона, Гарвея и Ньютона.

Пагубность механицизма подчеркивает и французский социолог Бруно Латур. Его проект «философии Геи» остался незавершенным, однако в работах по истории научных практик раскрываются различные грани необходимости пересмотра взаимоотношения человека, общества и государства с природой и неизменно стремление показать, что знание о природе представляет собой социальный конструкт [2, с. 45, 46].

«Механистическое мировоззрение» Латур отсчитывает с момента изобретения галилеевых объектов и планетарного видения, вылившегося в привычку рассматривать издалека и словно бы ниоткуда не только движение космических тел, но и все те процессы, что происходят на Земле непосредственно. «Окольный путь через внешнее вводит в понятие “природа” путаницу, которую нам до сих пор не удалось преодолеть.

Если до XVI в. это понятие включало в себя широкую гамму движений, о чем свидетельствует этимологическое значение латинского слова *natura* и греческого *φύσις*, которые можно перевести как генезис, рождение, процесс, ход вещей, – то в дальнейшем употреблении прилагательного “природный” или “естественный” оно все более ограничивалось лишь тем, что предполагает единственный тип движения, тот самый, который можно наблюдать извне. Именно такой смысл приобрело слово “природа” в выражении “наука о природе”» [2, с. 120].

Природа, «созданная» наукой XVII–XVIII вв., выступала мерой множества разнообразных социальных идей. К примеру, идеи естественного права и общественного договора. Эту сцепку социального и природного исследует другой французский ученый, историк и философ науки Мишель Серр в своей работе «Договор с природой»⁴: «Природа сводится к человеческой природе, которая, в свою очередь, сводится либо к истории, либо к разуму. Мир исчезает. Нововременное естественное право отличается от классического именно этим забвением мира <...> Общественный договор прекращал свое действие и замыкался на самом себе, оставляя весь мир с его колоссальным разнообразием вне игры, то есть сведенным к статусу пассивного объекта присвоения. Чем больше человеческого разума – тем меньше природы» [6, с. 80]. Его критическое исследование взаимосвязи знания о природе и норм права призывает пересмотреть привычную логику рассуждения и аргументации о месте человека в мире и последствиях его деятельности. Серр предлагает вариант пересмотра существующей традиции понимания и отношения к природе: «Будучи исключительно социален, наш договор становится смертельно опасен и для продолжения нашего вида, и для его объективного и глобального бессмертия. Что есть природа? Прежде всего это совокупность условий самой человеческой природы, ее глобальных ограничений для возрождения или вымирания, это – гостиница, предоставляющая нам свои номера, хлеб насущный и обогрев, и как только мы начинаем этим злоупотреблять, она их у нас отбирает. Именно она обуславливает человеческую природу, которая теперь в свою очередь обуславливает ее. И природа ведет себя как субъект» [6, с. 81, 82].

Такое перенесение смыслов «природы» на человека: на женщину, разум, общество и обратное присвоение социальных характеристик «природе» получает название натурализации. Отказ от натурализации – первый шаг к осмыслению антропоцена.

Понимая под натурализацией *предметно* – риторическую стратегию «оестествления» и обращения за примерами аргументации социальных феноменов к

⁴ Переведена на рус. яз. в 2022 г., оригинальное издание – 2018 г.

миру природы, *концептуально* – стремление сконструированные положения и понятия представить как самоочевидные и универсальные законы, американский историк науки Лоррейн Дастон вплотную приближается к проблеме исторической изменчивости содержания понятий «природа» и «человек». По мнению Л. Дастон, натурализируя, мы обращаемся к природе не за ответами, а за примерами – иллюстрациями наших собственных умозаключений. Природа выступает доступной и наглядной площадкой для демонстрации рационального.

В работах «Против природы» (англ. *Against nature*) [11] и «Правила: краткая история того, что регулирует нашу жизнь» (англ. *Rules: A Short History of What We Live By*) [12] тон Л. Дастон становится все более критичным, а стремление показать прямую взаимосвязь между историческими приключениями «натуралистического заблуждения» (англ. *naturalistic fallacy*) и проблемами современности – все более настойчивым: «Только используя панорамное видение [исторического контекста. – Ю. Ш.], я смогу заострить противоречия, точно определить переходные моменты и, что всего важнее, задействовать все ресурсы истории, чтобы поставить под сомнение самоочевидность привычных нам современных паттернов мышления. Такое обращение к истории, особенно истории, протяженной во времени, призвано нарушить текущие "безусловности" (англ. *certainties*) и тем самым расширить наше представление о том, что можно помыслить» [12, с. 22].

Английский представитель объектно-ориентированной философии Тимоти Мортон вдохновенно вскрывает агрокультурные смыслы «природы», обращаясь к началу эпохи голоцена и месопотамским цивилизациям Междуречья в поисках оснований утилитарного отношения к окружающему миру [5, с. 63]. Мортон настойчиво призывает отказаться от восприятия природы как «величественных декораций для людских деяний» [4, с. 55]. Используя культурные коды разных исторических эпох, ученый не оставляет попыток донести до своих читателей мысль о необходимости развития «экологического сознания», включения в интеллектуальный дискурс «нелюдей» и культивации солидарности с этим «нечеловеческим народом», от которого напрямую зависит будущее человека. «Превосходство существования представляет собой базовую онтологию, базовый утилитаризм, и еще до того, как философия приступила к его формализации, оно уже было встроено в социальное пространство, которое сегодня охватило собой почти всю поверхность Земли. <...> Какое-то время назад люди порвали свои социальные, философские и психические связи с нелюдью. В каждом из аспектов нашего существования мы уперлись в голую стену», – в своей оценке антропоцентризма философ и филолог Мортон не оставляет попыток отыскать такие языковые средства и образные категории, которые помогут не агрессивно, но действенно донести до нашего антропоцентричного сознания сухие факты вроде того, что человечество живет в эпоху шестого массового вымирания [5, с. 64].

Американская экофеминистка и антрополог Донна Харауэй предлагает альтернативный антропоцену термин «хтулуцен» [9, с. 18]. Подход Харауэй во многом созвучен идеям Мортон – она делает акцент на симбиотических отношениях внутри сети взаимосвязей между живыми организмами, а также подчеркивает ризоматический (разветвленный, нелинейный) характер знания и исторического процесса. Харауэй призывает «заводить сородичей», создавать новые системы родства и преодолевать видовые границы «сосуществуя-с» с «видами-компаньонами» – категорией, которая помогает «отказаться от идеи человеческой исключительности, не впадая в постгуманизм» [9, с. 31]. Харауэй предлагает своего рода манифест нового нарратива о человеке и природе: «(2) Человек как биологический вид не создает историю. (3) Комплекс "человек + инструмент" не создает историю. А именно так рассказывают Историю сторонники человеческой исключительности. (4) Эта История должна уступить место геоисториям, повествованиям Геи, симхтоническим историям; земляне живут и умирают сетевым, переплетенным и тентакулярным образом в симпозиционных многовидовых веревочных узорах...» [9, с. 73, 74]. Харауэй также является автором

подхода «ситуативных знаний», суть которого сводится к включению в историко-научный дискурс самых разных вариантов локализованного знания, отброшенных в свое время непреклонной избирательностью «объективного» и «отстраненного» наблюдения.

4. Обсуждение

Обращение историков науки к таким проблемам современности, как экологические угрозы и социальные заблуждения на их счет – не просто дань принципу актуальности. Во многом это следствие тонко настроенной способности к рефлексии, ведь «расследование» истории науки ведется с позиций самой же науки: сколько бы ни был удален во времени интересующий нас сюжет, мы не можем не задаваться вопросом, какую роль он сыграл в той цепи событий, что привела к текущему состоянию. При этом как бы скептически мы ни были настроены по отношению к настоящему и какие бы неутешительные прогнозы ни строили по поводу будущего, цель никогда не заключается в том, чтобы развенчать и низвергнуть науку как общественный институт, скорее, через расширение представления о ее прошлом, обнаружение и осмысление альтернативных содержаний таких понятий, как «природа» и «человек», и оригинальных траекторий становления сообществ и институтов, нетрадиционных поведенческих паттернов подвергнуть таким образом деконструкции сложившийся метанарратив науки. В каком-то смысле такой подход – вариант применения принципа «фальсифицируемости» К. Поппера, который, в противовес Куну, говорил не о преемственности революций, складывающихся в научную картину мира, а о перманентной революции науки в условиях открытого общества, когда наука не просто «засвидетельствует» мир и выносит в его отношении экспертные суждения, но прозрачным и прямым образом участвует в его преобразовании [7]. Колоссальное количество не только историков, философов и социологов науки сегодня руководствуется этим принципом. Отсюда – многообразие и пестрота всплывающих на поверхность публичного доступа сюжетов, которые долгое время оставались внутренним делом профессиональной корпорации. Сегодня нет нужды цепляться за панегирическую традицию истории науки. В отношении состояния научного знания мы просто не имеем права не заметить, что «так сложилось исторически». Ученому абсолютно любой специализации следует задаваться вопросом, как и почему сложились именно те механизмы производства и артикуляции научного знания, в рамках которых он трудится, и, возможно, вдохновляясь примерами прошлого (и упомянутыми выше радикальными подходами к изучению знания настоящего), отваживаться на поиски альтернатив. В этом смысле история науки обладает столь же огромным освобождающим потенциалом для человеческого сознания, какой несут самые поразительные открытия в области астрофизики, геологии или промышленной экологии. История науки – пространство для честного диалога и рефлексии о мире, «который состоит почти что целиком не из нас» [5, с. 65].

5. Выводы

Предлагая вниманию читателя данный обзор трудов современных зарубежных исследователей, мы стремились прежде всего показать, какими дискурсивными возможностями обладает история науки для всех интересующихся проблемами антропоцена, экологии и научной эффективности – не только для историков или представителей конкретной области знания, любопытствующих об истоках их дисциплины. История научного знания дает нам образцы не только преемственности, но и противоречивости и смысловых разрывов в познании природы. Приведенные варианты трактовки понятия «природа» подтверждают этот тезис.

Работы Дастон, Латура, Мерчант, Мортон, Серра и Харауэй – яркие примеры критической теории в отношении круга проблем взаимодействия человека и природы.

Все они по-разному расставляют акценты, привлекая внимание к различным аспектам проявления антропоцентричного сознания, диктующего утилитарное отношение к среде и населяющим ее видам. Все они предлагают оригинальные подходы к решению проблемы антропоцена: отказ от натурализации и выстраивание принципиально новых межвидовых отношений (на принципах солидарности и родства), создание этической и правовой нормативности, учитывающей интересы не только человека, и переосмысление понятия «человек» в целом.

Все упомянутые нами работы опираются в своем анализе и творческой интенции на историко-научные изыскания. Обращение к прошлому не только ради риторики, но с целью поиска альтернативных (отринутых или забытых) путей развития знания, которые могут оказаться востребованными теперь, – такова общая черта описанных нами трудов.

История науки сегодня больше не панегирическая летопись имен и открытий. Оставаясь по-прежнему способом нарративизации столкновений знания и власти, история науки все чаще выступает для исследователей как источник вдохновения, как поле для пристального рассмотрения допущенных ошибок и, пожалуй, самое главное – как междисциплинарное пространство для коммуникации.

6. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-18-00488 «Кризис ценностей и стратегии преодоления: Идея “Общего блага” в интеллектуальном дискурсе Британии и России (1650–1750)»).

7. Список литературы

1. *Брайдотти, Р.* Постчеловек / Р. Брайдотти; пер. с англ. Дианы Хамис. – М.: Издательство Института Гайдара, 2021. – 408 с.
2. *Латур, Б.* Где приземлиться? Опыт политической ориентации / Б. Латур. – СПб. : Европейский университет в Санкт-Петербурге, 2019. – 202 с.
3. *Мерчант, К.* Смерть природы: производство, воспроизводство и женское / К. Мерчант // Логос. – 2022. – Т. 32, № 1. – С. 191–222.
4. *Мортон, Т.* Род человеческий. Солидарность с нечеловеческим народом / Т. Мортон; пер. с англ. Елены Бондал. – М. : Издательство Института Гайдара, 2022.
5. *Мортон, Т.* Статья экологичным / Т. Мортон; пер. с англ. Дмитрия Кралечкина. – М. : Ад Маргинем Пресс, 2022. – 200 с.
6. *Серр, М.* Договор с природой / М. Серр; пер. с фр. Сергея Рындина. – СПб.: Издательство Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2022. – 222 с.
7. *Фуллер, С.* Кун против Поппера / С. Фуллер; пер. с англ. В. В. Целищева – М. : Канон+ РООИ «Реабилитация», 2020. – 272 с.
8. *Фуллер, С.* Постправда: знание как борьба за власть / С. Фуллер; пер. с англ. Д. Кралечкина. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. – 368 с.
9. *Харауэй, Д.* Оставаясь со смутой: Заводить сородичей в Хтулуцене / Д. Харауэй; пер. с англ. А. Писарева, Д. Хамис и П. Хановой. – Пермь : Гиле Пресс, 2020. – 340 с.
10. *Хедрик, Д.* Власть над народами. Технологии, природа и западный империализм с 1400 года до наших дней / Д. Хедрик. – М. : Издательский дом ДЕЛО, 2021. – 560 с.
11. *Daston, L.* Against nature / L. Daston. – Cambridge, MA : MIT Press, 2019. – 96 p.
12. *Daston, L.* Rules: Short History, What We Live By/ L. Daston. – Princeton, Oxford: Princeton University press, 2022. – 359 p.

Сведения об авторах:

Шипицына Юлия Сергеевна, ассистент кафедры зарубежного регионоведения УрФУ, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: shipitsyna.phd@gmail.com.

HISTORY OF SCIENCE ABOUT THE PROBLEM OF ANTHROPOCENE AND DECONSTRUCTION OF NATURE

Yu. S. Shipitsyna

Ural Federal university, Ekaterinburg, Russia

The article deals with the problem of rethinking anthropocene in the multidisciplinary space of history of science. The author suggests the observation of key texts about history, science and ecological crisis, among there are works of Caroline Merchant, Bruno Latour, Lorrein Daston, Michel Serres, Timothy Morton and Donna Haraway. Through the examples of their researches the author shows the high value of methodology and experience of history of science. To conclude the author highlights the cognitive opportunities of this discipline as field of scientific reflection and space for dialogue about contemporary dares of anthropocene and ecological problems. The special attention is paid the term nature, its historical variability and richness of senses.

Key words: anthropocene, nature, ecological consciousness, history of science, Caroline Merchant, Bruno Latour, Lorrein Daston, Michel Serres, Timothy Morton, Donna Haraway.

References

1. *Braidotti, R. (2021) Postchelovek [The Posthuman]. Moscow: Izdatel'stvo Instituta Gajdara.*
2. *Haraway, D. (2020). Ostavaias' so smutoj: Zavodit' sorodichej v Htulutsene [Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene] (A. A. Pisarev, D. Ya. Khamis, & P. A. Hanova, Trans.). Perm: Gile Press.*
3. *Headrick, D. (2021) Vlast nad narodami. Tekhnologii, priroda i zapadnyj imperialism s 1400 goda do nashih dnei [Power over Peoples. Technology, Environments, and Western Imperialism, 1400 to the Present]. Moscow: Izdatelskij dom Delo*
4. *Daston, L. (2019) Against Nature. Cambridge, MA: MIT Press.*
5. *Daston, L. (2022) Rules: Short History, What We Live By. Princeton, Oxford: Princeton University press.*
6. *Fuller, S. (2020) Kun protiv Poppera [Kuhn vs. Popper. The struggle for the soul of science]. Moscow: Kanon+ ROOI "Reabilitaciya"*
7. *Fuller, S. (2021) Postpravda: znanie kak borba za vlast [Post-Truth. Knowledge as a Power Game]. Moscow: Izd. Dom Vysshej shkoly ehkonomiki.*
8. *Latour, B. (2019) Gde prizemlit'sja? Opyt politicheskoj orientacii [Ou Atterir? Commen S'Orientir en Politique] (A. Shestakov, Trans.). St Petersburg.: Izdatel'stvo Evropejskogo universiteta.*
9. *Merchant, C. (2022) Smert prirody: proizvodstvo, vosproizvodstvo i zhenskoe [The Death of Nature: Production, Reproduction, And the Female] // Logos. Vol. 32. № 1. P. 191–222.*
10. *Morton, T. (2022) Rod chelovecheskij. Solidarnost's nechelovecheskim narodom [Humankind. Solidarity with Nonhuman People]. Moscow: Izdatel'stvo Instituta Gajdara.*
11. *Morton, T. (2022) Stat ehkologichnym [Being ecological]. Moscow: Ad Marginem Press.*
12. *Serres, M. (2022) Dogovor s prirodoj [Le contrat naturel]. St Petersburg: Izdatel'stvo Evropejskogo universiteta v Sankt-Peterburge.*

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ ОСАДКЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Е. О. Илгашева

*Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия*

В статье рассматривается вклад фрагментов строительных материалов в формирование рыхлого поверхностного осадка десяти городов России: Уфы, Перми, Тюмени, Челябинска, Нижнего Тагила, Магнитогорска, Нижнего Новгорода, Ростова-на-Дону, Мурманска, Екатеринбурга. В ходе настоящего исследования были получены данные об элементном составе и морфологии частиц строительных материалов, составляющих часть поверхностного осадка.

Изучаемые частицы были отобраны из проб поверхностного осадка, разделенных на гранулометрические фракции. Изучены фракции 100–250 и 250–1 000 мкм. Частицы, схожие с фрагментами строительных материалов, были отобраны с помощью методов визуальной диагностики и изучены с помощью методов сканирующей электронной микроскопии, в т. ч. энергодисперсионной спектроскопии.

В ходе исследования отобранные частицы были отнесены к трем классам: фрагменты керамического кирпича, фрагменты краски, фрагменты штукатурки и цементных смесей. Кроме петрогенных элементов, составляющих основу частиц, в составе строительных материалов присутствовали тяжелые металлы (Cr, Zn, Pb).

Полученные данные свидетельствуют о том, что частицы строительных материалов – часть техногенной составляющей осадка в урбанизированной среде.

Ключевые слова: поверхностные отложения; седиментогенез; строительные материалы; керамический кирпич; штукатурные смеси; цементные смеси; лакокрасочные материалы.

1. Введение

Ускорение темпов урбанизации неизбежно приводит к усилению антропогенного воздействия на окружающую среду и ухудшению качества ее основных компонентов: воды, воздуха, почв и грунтов. На сегодняшний день актуальны исследования механизмов образования, изменения и миграции рыхлых техногенных поверхностных отложений. Такие отложения сформированы в результате сочетания различных процессов, т. е. являются осадками смешанного генезиса. В летний период поверхностный осадок подвержен процессам выветривания – механического, химического и биологического; перенос осуществляется ветром и под влиянием антропогенного фактора (автомобильный транспорт, строительство и эксплуатация зданий, сооружений, коммунальных сетей). В зимний период осадконакопление связано с абразией шин и дорожного полотна, плохой уборкой территорий от снега и снегогрязевой пульпы, использованием реагентов. В периоды оттепелей и дождей происходит перенос и миграция осадков, их накопление в пониженных частях рельефа, реках и озерах.

Весомый вклад в образование поверхностного осадка вносит строительство и эксплуатация зданий и сооружений. В России объемы строительства жилья в 2021 г. выросли почти на 13 % по сравнению с 2020 г. Количество построенных за год жилых домов стало наибольшим за всю историю страны и в настоящее время продолжает расти. В период строительства неизбежно образование отходов, количество которых зависит от объема используемых строительных материалов, периода ведения строительных работ, количества техники и человеческих ресурсов, задействованных в

данном строительстве. Около 50 % всего объема отходов приходится на строительную индустрию. В ходе строительства используются как природные, так и искусственно образованные материалы. Настоящее исследование является актуальным, т. к. разрушение материалов, их перенос и дальнейшая трансформация в поверхностных условиях – источник аномалий, возникновения новых геохимических барьеров, увеличения мощности культурного слоя, воздействующих на здоровье человека.

2. Материалы и методы

Фрагменты строительных материалов были отобраны из проб поверхностного осадка десяти городов России: Уфы, Перми, Тюмени, Челябинска, Нижнего Тагила, Магнитогорска, Нижнего Новгорода, Ростова-на-Дону, Мурманска, Екатеринбурга. Все перечисленные города отличаются высоким уровнем урбанизации и темпом строительства. К пробам поверхностного осадка относятся: грунты – ненарушенные пробы почвы на газонах; пробы грунта во дворах и на внешней части экспериментальных площадок; пробы поверхностного осадка городской среды, отобранные в пониженных участках рельефа; пробы осадка на проезжей части улиц, в т. ч. дорожная пыль. Процедура отбора проб подробно описана в ранее опубликованных статьях [1–3]. Для изучаемых образцов проводилось определение гранулометрического состава. Сухим просеиванием отделялась фракция размером больше 1 мм. Мокрым ситованием отделялись гранулометрические фракции 0,05–0,1 мм, 0,1–0,25 мм и 0,25–1 мм. В настоящем исследовании использованы фракции 100–250 и 250–1000 мкм (табл. 1).

Таблица 1. Распределение числа проб, отобранных в городах и исследуемых для определения техногенной фазы

Город	Общее число отобранных проб поверхностного осадка в городе	Число проб поверхностного осадка, в которых проведен гранулометрический анализ	Число полученных гранулометрических навесок, в которых отобраны техногенные частицы	
			Фракция 100–250 мкм	Фракция 250–1000 мкм
Екатеринбург	25	6	5	6
Магнитогорск	41	10	10	10
Нижний Тагил	69	11	11	11
Пермь	10	5	5	3
Тюмень	43	7	7	5
Уфа	43	12	12	10
Челябинск	60	10	10	9
Мурманск	39	14	14	14
Ростов-на-Дону	37	12	12	12
Нижний Новгород	35	15	15	14

Полученный материал проб анализировался с помощью визуальной диагностики, которая заключается в изучении фракций 100–250 и 250–1000 мкм под микроскопом по принципу минерального шлихового анализа.

Для визуального анализа, изучения техногенных частиц и получения фотографий использовался металлографический микроскоп ХЖР-Н100. Микроскопы

XJP-N100 серии были разработаны для четкого наблюдения за прозрачными, полупрозрачными и непрозрачными предметами. В работе использовались объективы с увеличением в 4 и 10 раз (4x и 10x). Проводилось фотографирование на оптическом микроскопе, были описаны основные морфологические характеристики: размер, цвет, окатанность, прозрачность в различных режимах работы микроскопа.

Все отобранные частицы изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6390/6390LV (Япония), оборудованного приставкой для энергетической дисперсионной спектроскопии (ЭДС) INCA Energy 350 X-Max 50 с полупроводниковым детектором. Исследования были проведены в ЦКП «Геоаналитик» на базе Института геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого.

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), оборудованный приставкой для энергетической дисперсионной спектроскопии (ЭДС), позволяет получить изображение исследуемой частицы с учетом особенностей морфологии и химический состав частицы в точке. После получения данных о морфологии и химическом составе частиц, а также включениях, входящих в состав частиц, делается вывод о принадлежности их к определенному классу и возможном генезисе.

3. Результаты

Обломки строительных материалов представлены фрагментами кирпича, штукатурки и краски. В ходе исследования из проб поверхностного осадка (фракция 250–1000 мкм) было отобрано 177 частиц строительных материалов. Из них 90 частиц – фрагменты кирпича, 52 частицы – фрагменты штукатурки, 35 частиц – фрагменты краски. Распределение по городам представлено на рис. 1.

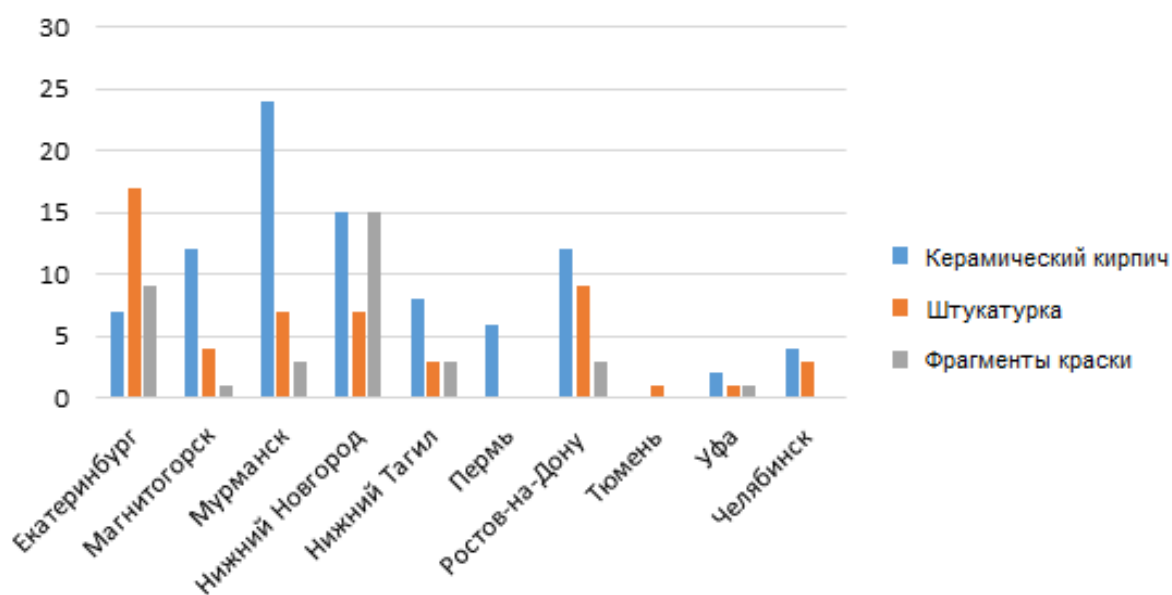


Рис. 1. Распределение частиц строительных материалов по городам

Для всех изученных частиц были описаны цвет, окатанность (по Рухину, 1961), механические (упругость, ковкость, хрупкость) и оптические (прозрачность, блеск) свойства (при возможности определения). Фрагменты керамического кирпича представлены частицами хорошей степени окатанности. Частицы состоят из нескольких компонентов (кварц, глинистый материал, редко белила). Цвет обломков желтовато-коричневый, красно-коричневый до темно-красного с вкраплениями (рис. 2, 3). Фрагменты краски представлены тонкими, уплощенными частицами (рис. 4, 5). Некоторые частицы обладают упругими свойствами. Цвет разнообразный: желтый, красный, синий, зеленый с матовой или блестящей поверхностью. Фрагменты штукатурки представлены тонкими, уплощенными частицами, отличающимися высокой хрупкостью. Степень окатанности не определяется. Цвет частиц варьируется от

светло-серого до белого, непрозрачные, матовые (рис. 6, 7).

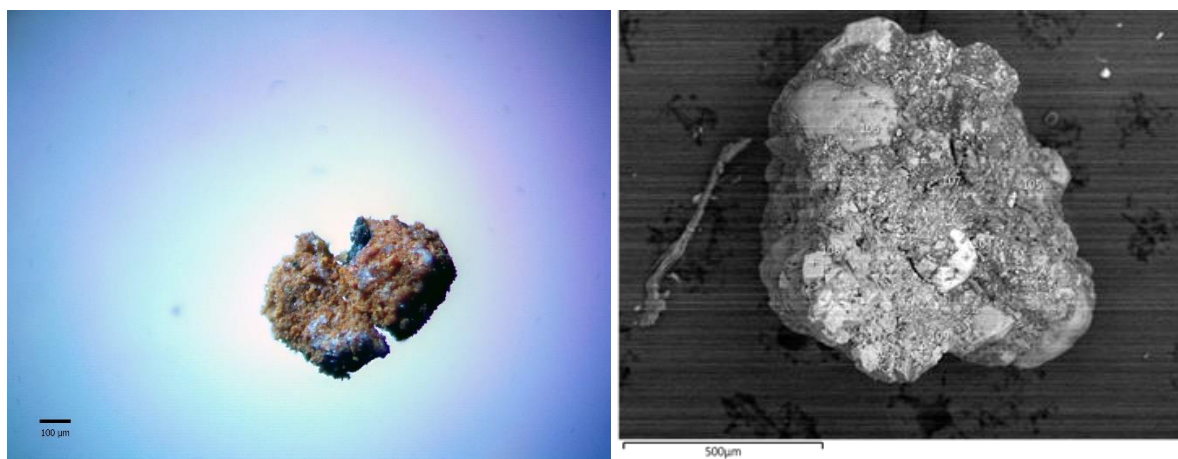


Рис. 2, 3. Фрагмент керамического кирпича (слева – фото с оптического микроскопа, справа – фото СЭМ)

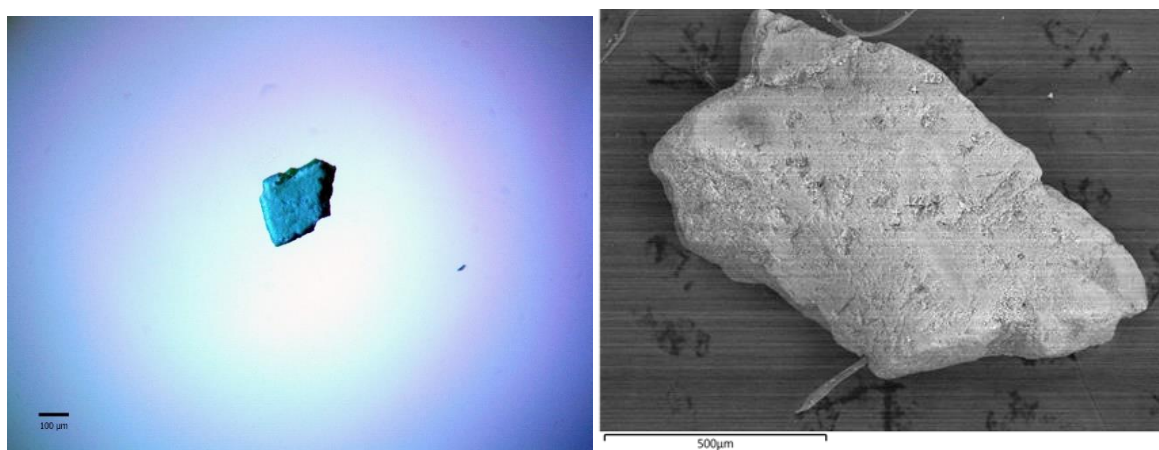


Рис. 4, 5. Фрагмент краски (слева – фото с оптического микроскопа, справа – фото СЭМ)

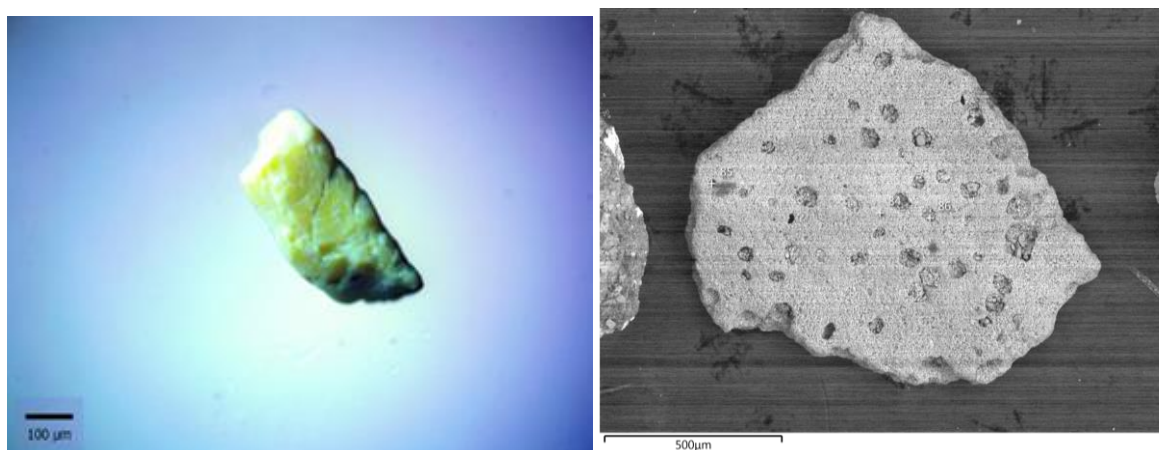


Рис. 6, 7. Фрагмент штукатурки (слева – фото с оптического микроскопа, справа – фото СЭМ)

Элементный состав частиц был определен с помощью ЭДС. По данным 57 анализов, основные компоненты в составе керамического кирпича – петрогенные элементы, поэтому химический состав колеблется в широких пределах: SiO_2 – до 99 %; Al_2O_3 – 10–97 %; CaO – 2–63 %; FeO – 10–30 %; MgO – 2–20 %; TiO_2 – до 1 %, что соответствует составу глин (рис. 8). Оксиды кремния и алюминия находятся в

глинах в связанном состоянии, т. е. в составе глинообразующих минералов (рис. 9), также источником кремнезема может служить кварцевый песок. Оксиды кальция и магния входят в состав глинистых материалов в виде известняков, доломитов, сульфатов (рис.10). Оксид титана входит в состав белил, является внешним покрытием. Сочетание натрия и хлора свидетельствует о наличии высолов на поверхности кирпича в виде галита (NaCl).

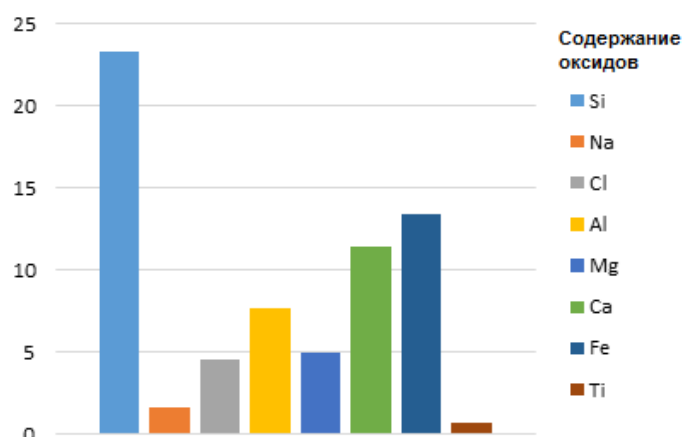


Рис. 8. Элементный состав керамического кирпича (по данным 57 ЭДС-спектров СЭМ)

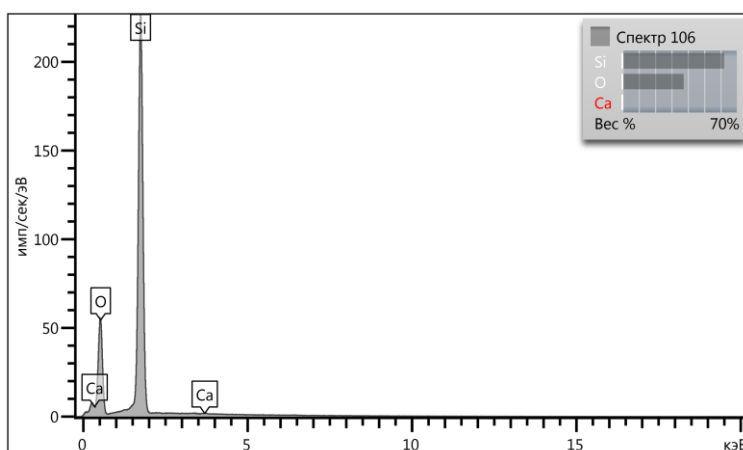


Рис. 9. Элементный состав керамического кирпича в точке. Спектр № 106 (данные ЭДС)

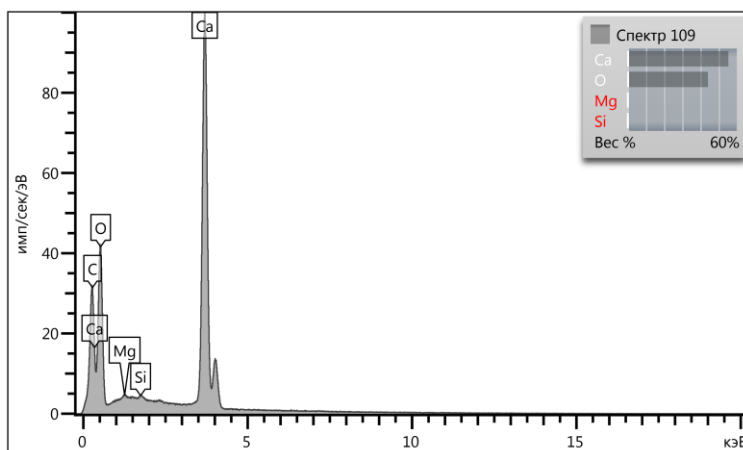


Рис. 10. Элементный состав керамического кирпича в точке. Спектр № 109 (данные ЭДС)

По данным 35 ЭДС-анализов, химический состав частиц краски представлен оксидами кальция, магния, реже кремния, составляющими основу частицы (штукатурка, кирпич), оксидами титана и свинца (пигменты) и оксидами хрома, цинка, железа и бария (внешние поллютанты) (рис. 11–13).

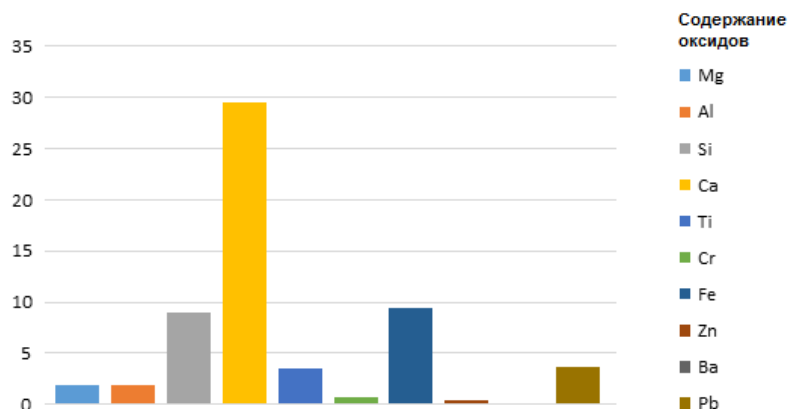


Рис. 11. Элементный состав краски (по данным 35 ЭДС-спектров СЭМ)

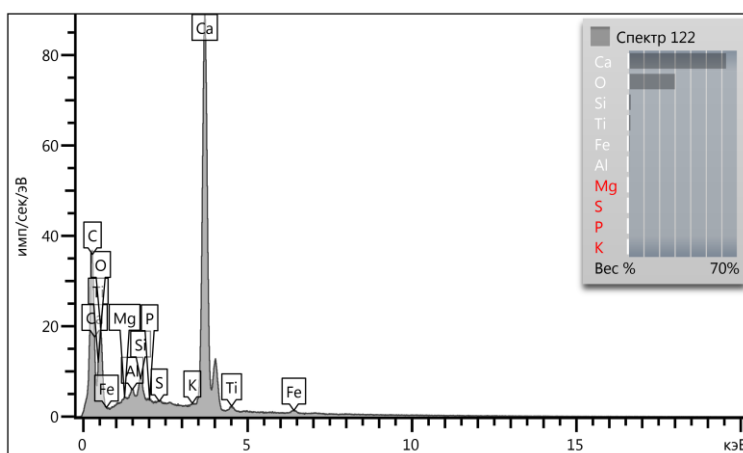


Рис. 12. Элементный состав краски в точке. Спектр № 122 (данные ЭДС)

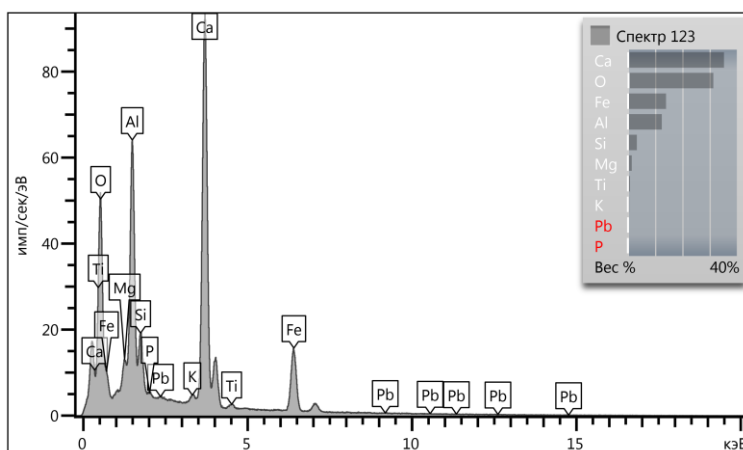


Рис. 13. Элементный состав краски в точке. Спектр № 123 (данные ЭДС)

Химический состав штукатурки, по данным 49 ЭДС-спектров, характеризуется высоким содержанием кальция, небольшими примесями оксидов кремния и магния, что характерно для состава строительных растворов и бетона (рис. 14, 15). Согласно химическому составу, можно сделать вывод, что частицы строительной смеси

представлены алитом. Алит – трехкальциевый силикат, состав которого характеризуется вхождением в структуру Mg, Al, P, S и Fe. Он является наиболее важной составляющей всех обычных цементных клинкеров [5].

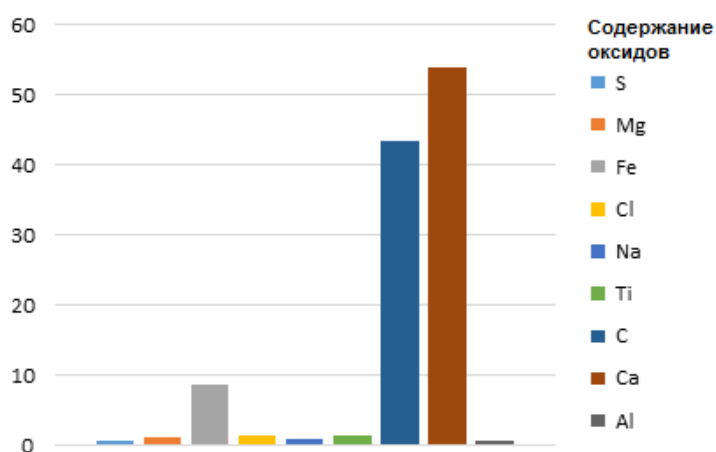


Рис. 14. Элементный состав штукатурки (по данным 49 ЭДС-спектров СЭМ)

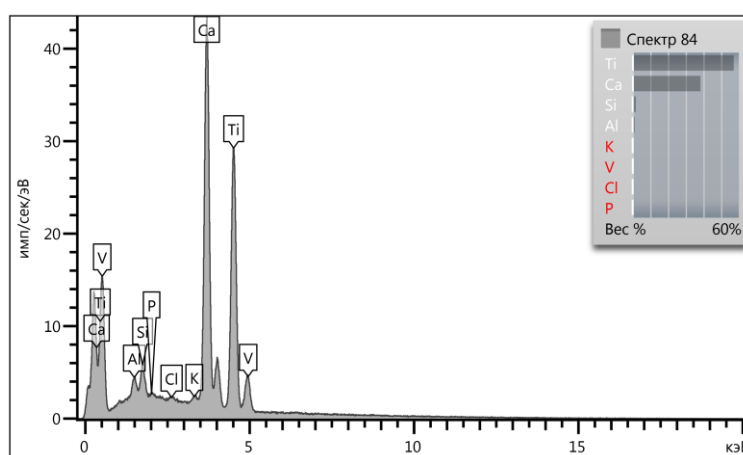


Рис. 15. Элементный состав штукатурки в точке. Спектр № 84 (данные ЭДС)

4. Обсуждение

Согласно полученным данным, города России значительно различаются по общему количеству частиц строительных материалов и их распределению по типам. Так, больше всего частиц строительных материалов было обнаружено в поверхностном осадке Екатеринбурга, Мурманска, Нижнего Новгорода и Магнитогорска. Меньше всего – в Тюмени, Перми, Уфе и Челябинске. Эти данные не коррелируют с объемами строительства новых зданий и сооружений, поэтому можно сделать вывод, что любое строительство является источником техногенного материала.

Строительные материалы, как и все техногенные и природные частицы, подвергаются различным типам выветривания: физическому, химическому, биологическому. К факторам физического выветривания относятся колебания температуры, давление воды, расширяющейся при замерзании, и растворяющее действие воды. Факторы химического выветривания – это в основном гидролитическое действие воды, химическое растворение и воздействие природных и промышленных газов. Биологическое выветривание обусловлено жизнедеятельностью организмов. Считается, что относительная стойкость (устойчивость ко внешним воздействиям) строительных материалов изменяется в следующем порядке: стекло > глазурированный кирпич > неглазурированный кирпич > бетон > цементный раствор > штукатурка и гипсокартон > краска [6]. В результате выветривания происходит как механическое

разрушение строительных материалов – растрескивание, размывание и растворение, так и химическое изменение – появление высолов, поэтому разница в отношении количества частиц по типам в каждом городе может быть обусловлена как факторами выветривания, так и использованием разных типов исходного сырья для получения строительных материалов [7].

Согласно данным ЭДС-анализов, частицы строительных материалов являются в первую очередь источником петрогенных элементов: Si, Al, Mg, Ca, Fe, Na. В качестве включений могут наблюдаться тяжелые металлы и токсичные элементы: Cr, Zn, Pb. Поступление обломков строительных материалов и строительной пыли приводит к увеличению концентрации Si, Ca и Mg в окружающей среде.

Соединения свинца чаще всего добавляют в краски в качестве пигментов. В соответствии с ГОСТ Р 52491-2005 в России допускаемое количество пигментов, содержащих свинец, равно ≤ 1 % для эмалей и масляных красок. Для внутренних работ содержание свинца не допускается. В других странах содержание свинца в лакокрасочных материалах не допускается. По данным ЭДС-анализов, в точке, попадающей на пигмент, содержание свинца повышается до 6–8 %. Однако по массе содержание свинца не превышает допустимое значение.

Содержание оксида цинка в красках (цинковых белилах) регламентируется ГОСТ 202-84, также в цинковых белилах допускается содержание оксида свинца до 0,01 %. По полученным данным превышений не обнаружено.

Шестивалентный хром является пигментом и широко используется в пигментной части жидкой и порошковой краски.

5. Выводы

Техногенные частицы активно поступают в городскую среду и накапливаются в поверхностном осадке. Одна из составляющих современных поверхностных отложений – строительные материалы и продукты их изменения и разрушения. Фрагменты кирпича, краски, штукатурки и строительных смесей могут быть источниками как петрогенных (Si, Al, Mg, Ca, Na), так и токсичных элементов, а также тяжелых металлов (Cr, Zn, Pb), поэтому следует отслеживать объемы поступления вещества и пути миграции в городской среде. Для изучения техногенной составляющей поверхностного осадка, в частности строительных материалов, был применен комбинированный подход, включающий методы минералогического и экологического анализа. Данный подход может быть рекомендован для применения в экологических исследованиях других регионов.

6. Список литературы

1. Seleznev, A. A. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // *Sci Rep.* – 2020. – 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58434-4> (Дата обращения: 12.06.2023).
2. Seleznev, A. A. Method for reconstructing the initial baseline relationship between potentially harmful element and conservative element concentrations in urban puddle sediment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. P. Sergeev // *Geoderma.* – 2018. – 326. – 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.003> (Дата обращения: 12.06.2023).
3. Seleznev, A. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones / A. Seleznev, M. Rudakov // *Carpath. J. Earth Environ. Sci Rep.* – 14 (1). – 95–106. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/062> (Дата обращения: 18.06.2023).
4. Рухин, Л. Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах. / Л. Б. Рухин. – Ленинград : Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1961. – 778 с.
5. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества (технология и свойства) : учеб. для вузов / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – 3-е изд. перераб. и доп. - М. : Стройиздат, 1979. – 476 с.

6. *Howard, J. Anthropogenic Soils, Progress in Soil Science / J. Howard // Springer International Publishing AG 2017. – DOI 10.1007/978-3-319-54331-4_5.*
7. *Барабанщиков, Ю. Г. Строительные материалы и изделия : учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю. Г. Барабанщиков. – 5-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2014. – 416 с. ISBN 978-5-4468-1030-7.*
8. ГОСТ Р 52491-2005. Материалы лакокрасочные, применяемые в строительстве. Общие технические условия. – М. : Стандартиформ, 2006
9. ГОСТ 202-84. Белила цинковые. Технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1985.

Сведения об авторах:

Илгашева Екатерина Олеговна, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН. Старший преподаватель кафедры ГМП, ФГиГ Уральского государственного горного университета, г. Екатеринбург, Россия. Эл. адрес: katerina.ilgasheva@gmail.com.

CONSTRUCTION MATERIALS IN SURFACE DEPOSITS IN URBAN AREAS

E. O. Ilgasheva

*Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia*

The article examines the contribution of fragments of building materials to the formation of loose surface deposits in ten Russian cities: Ufa, Perm, Tyumen, Chelyabinsk, Nizhny Tagil, Magnitogorsk, Nizhny Novgorod, Rostov-on-Don, Murmansk, Yekaterinburg. During the study, data were obtained on the elemental composition and morphology of particles of building materials included in the composition of surface deposits.

The particles under study were taken from samples of surface sediment, divided into granulometric fractions. Fractions 100–250 and 250–1000 μm were studied. Particles similar to fragments of building materials were isolated using visual diagnostic methods and studied using scanning electron microscopy, including energy-dispersive spectroscopy.

During the study, the isolated particles were classified into three classes: fragments of ceramic bricks, fragments of paint, fragments of plaster and cement mixtures. In addition to the petrogenic elements that form the basis of the particles, heavy metals (Cr, Zn, Pb) were present in the building materials.

The data obtained indicate that particles of building materials are part of the technogenic component of sediments in the urban environment.

Key words: surface deposits; sedimentogenesis; construction materials; ceramic brick; plaster; cement; paint materials.

References

1. Seleznev, A. A. Urban geochemical changes and pollution with potentially harmful elements in seven Russian cities / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, G. P. Malinovsky // Sci Rep. – 2020. – 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58434-4> (Date: 12.06.2023).
2. Seleznev, A. A. Method for reconstructing the initial baseline relationship between potentially harmful element and conservative element concentrations in urban puddle sediment / A. A. Seleznev, I. V. Yarmoshenko, A. P. Sergeev // Geoderma. – 2018. – 326. – 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.003>. (Date: 12.06.2023).
3. Seleznev, A. Some geochemical characteristics of puddle sediments from cities located in various geological, geographic, climatic and industrial zones. / A. Seleznev, M. Rudakov // Carpath. J. Earth Environ. Sci Rep. – 14 (1). – 95–106. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/062>. (Date: 18.06.2023).
4. Rukhin, L. B. Fundamentals of lithology. The doctrine of sedimentary rocks. State scientific and technical publishing house of oil and mining-fuel literature / L. B. Rukhin. – Leningrad, 1961, – 778 p.
5. Volzhensky, A. V. Mineral binders: (technology and properties): Textbook for universities / A. V. Volzhensky, Yu. S. Burov, V. S. Kolokolnikov. – 3rd ed. reworked and additional – M. : Stroyizdat, 1979. – 476 p.
6. Howard, J. Anthropogenic Soils, Progress in Soil Science / J. Howard // Springer International Publishing AG 2017. – DOI 10.1007/978-3-319-54331-4_5.
7. Barabanshchikov, Yu. G. Construction materials and products: textbook. for students institutions prof. education / Yu. G. Barabanshchikov. – 5th ed., erased. – M.: Publishing center “Academy”, 2014. – 416 p. ISBN 978-5-4468-1030-7.
8. GOST R 52491-2005. Paint and varnish materials used in construction. General technical conditions. Moscow. Standardinform, 2006.
9. GOST 202-84. Zinc whitewash. Technical conditions. Moscow: IPC Standards Publishing House, 1985.

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РАНДОМИЗАЦИОННЫЙ ТЕСТ: ИДЕЯ, АЛГОРИТМ, ПРЕИМУЩЕСТВА, НЕДОСТАТКИ И ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ

А. П. Сергеев^{1,2}, А. С. Буторова^{1,2}, Е. А. Корюкин², В. С. Бобаков², С. В. Павлова²

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Пермутационный подход имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными параметрическими статистическими методами, что делает его более предпочтительным для обработки данных в некоторых исследовательских ситуациях. Пермутационные методы не используют предположений о виде распределения вероятностей; подходят для небольших наборов данных и дают исследователю большую свободу выбора тестовой статистики. Настоящая статья посвящена применению одного из вариантов пермутационных методов – непараметрическому рандомизационному тесту. Авторы излагают предпосылки рандомизационного теста и приводят некоторые формализации для случая сравнения двух групп наблюдений. В работе рассматривается пример применения рандомизационного теста для проверки статистической гипотезы о равенстве нулю межгрупповой разности средних значений в случаях правостороннего и левостороннего критических множеств. В примере сравнивается производительность двух способов очистки – стандартного и нового. В правостороннем случае в качестве тестовой статистики выступает сумма времен очистки в группе стандартного способа, в левостороннем случае – межгрупповая разность средних времен. С помощью рандомизационного теста показано, что новый способ очистки не дает статистически значимого преимущества во времени очистки перед стандартным способом.

Ключевые слова: пермутационный подход; рандомизационный тест; перестановка; проверка статистических гипотез; ошибка первого рода; ошибка второго рода; p -значение.

1. Введение

Непараметрический рандомизационный тест – один из представителей пермутационных методов – был впервые применен в 1935 г. Рональдом Эйлмером Фишером (1890–1962 гг.) для построения точного статистического вывода в задаче оценки связи между двумя дихотомическими переменными [1–3]. Пермутационный подход требует большого объема вычислений, характерного для комбинаторных объектов. Такие объемы вычислений практически невозможно провести вручную, а Алан Тьюринг построит электромеханический компьютер только через пять лет в 1940 г.

Современные компьютеры обладают вычислительной мощностью, достаточной, чтобы успешно работать с комбинаторными объектами и применять пермутационный подход для статистического вывода [4–6]. Этот подход применим практически в любой предметной области, которая имеет дело с вероятностной формализацией процедуры принятия решений в условиях неопределенности [7–11]. Пермутационные методы являются не только инструментом принятия решений, но также могут использоваться исследователями для построения метрик их уверенности в обоснованности уже принятого решения [8].

Основная идея пермутационных методов заключается в том, что выполняются все перестановки или заранее определенное число перестановок данных, для каждой из которых вычисляется некоторая выбранная исследователем из предметных

соображений статистика, наблюдаемое распределение которой принимается за референтное распределение.

Пермутационный подход предполагает две вероятностных модели статистического вывода: рандомизационную и популяционную [12–14]. Согласно рандомизационной модели (рандомизационные тесты) множество доступных объектов разбивается на несколько непересекающихся групп случайным образом. Согласно популяционной модели (перестановочные тесты) объекты случайным образом отбираются из некоторой популяции или из нескольких популяций (субпопуляций). В рандомизационной модели используются процедуры, которые обычно называют рандомизационными тестами (тестами рандомизации).

Любая процедура статистического вывода допускает возможность ошибки в принятии решения. С помощью уровня значимости процедура статистического вывода позволяет контролировать и количественно оценивать вероятности ошибок. Вероятностями ошибок можно управлять с помощью приближенных методов вывода, однако успешность их применения будет варьироваться. Точные методы статистического вывода гарантируют контроль ошибок. При этом точные методы наиболее полезны, когда они позволяют контролировать ошибки при относительно широких допущениях. Эта идея будет проиллюстрирована ниже с помощью одновыборочного теста Стьюдента и доверительного интервала, которые являются точными только при ограничениях, накладываемых на распределение, из которого получены данные.

Любая процедура проверки статистической гипотезы предусматривает контроль вероятности ошибок первого и второго рода. Ошибка первого рода есть отклонение истинной нулевой гипотезы, ошибка второго рода – неотклонение ложной нулевой гипотезы. Заданный исследователем уровень значимости, обозначаемый обычно α , контролирует вероятность ошибки первого рода. Заметим, что вероятность ошибки первого рода не обязательно равна заданному уровню значимости. Вероятность ошибки первого рода есть вероятность получить p -значение меньше или равное α при справедливости нулевой гипотезы.

Цель настоящей работы – описать идею и показать внутреннее устройство рандомизационного теста, а также продемонстрировать его применение на примере тестирования статистической гипотезы об отсутствии межгруппового различия в выраженности признака.

2. Материалы и методы

Ниже покажем, как работает параметрический тест, на примере одновыборочного теста Стьюдента.

Пусть $X(1), \dots, X(n)$ – случайная выборка из нормального распределения с параметром положения m .

Нулевая гипотеза H_0 утверждает, что параметр положения m некоторой нормально распределенной переменной X равен m_0 . Проверим нулевую гипотезу $H_0: m = m_0$ против двусторонней альтернативы $H_1: m \neq m_0$.

Тогда представленная следующая T -статистика имеет распределение Стьюдента с числом степеней свободы $df = n - 1$:

$$T = \frac{\bar{X} - m_0}{S/\sqrt{n}}; \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} X(i); S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X(i) - \bar{X})^2}{n - 1}.$$

Перед тестированием гипотезы исследователь должен задать уровень значимости α .

Правило принятия решения: если наблюдаемое значение тестовой статистики попадает в критическое множество, тогда нулевую гипотезу следует отклонить:

«Если $|T_{obs}| \geq qT\left(df = n - 1, 1 - \frac{\alpha}{2}\right)$, тогда H_0 отклонить».

Здесь $qT(n-1, 1-\alpha/2)$ – квантиль порядка $1-\alpha/2$ распределения Стьюдента с числом степеней свободы $df = n-1$.

Ошибка первого рода возникает в случае, если модуль статистики теста равен или превышает квантиль $qT(n-1, 1-\alpha/2)$ при справедливости нулевой гипотезы. Тогда вероятность ошибки первого рода в точности равна выбранному уровню значимости α .

Однако если предположение о нормальности распределения случайной переменной X в популяции неверно, то и T -статистика не имеет t -распределения. Отсюда следует, что вероятность ошибки первого рода может быть не равна α , а иногда и значительно отличаться от α . В этом случае контролировать вероятность ошибки первого рода становится затруднительно, и исследователю остается только надеяться, что он ошибается не слишком сильно. Сформулируем определение точного теста: точный тест есть тест, для которого вероятность ошибки первого рода в точности равна заданному уровню значимости α . Например, одновыборочный тест Стьюдента будет точным только тогда, когда реализация выборки получена из нормального распределения. Аналогичная ситуация возникает при построении с использованием T -статистики доверительного интервала, например, для математического ожидания. Если реализация выборки получена не из нормального распределения, вероятность того, что построенный доверительный интервал содержит (накрывает) истинное значение оцениваемого параметра, может и, скорее всего, будет отличаться от заданной доверительной вероятности $1-\alpha$. Поэтому здесь одновыборочный доверительный интервал гарантированно будет точным только тогда, когда выборка получена из нормального распределения, что возможно только в идеальном случае, когда нормальное распределение намеренно сгенерировано исследователем. Другими словами, в условиях реального эксперимента у экспериментатора никогда не будет уверенности в нормальности распределения.

В случае рандомизационной модели случайное распределение доступных объектов по группам – единственная основа для статистического вывода. Необязательно иметь случайную выборку из некоторой популяции с заданным распределением. Однако при этом любые выводы в рандомизационной модели будут ограничены объектами исследования.

Пример. Предположим, что сравниваются стандартный и новый способы очистки некоторых объектов. При этом наблюдается время в секундах, в течение которого объект очищается до некоторого допустимого уровня. Нас интересует, действительно ли новый способ дает статистически значимое преимущество во времени очистки перед стандартным способом.

Из n объектов, доступных для исследования, n_1 случайным образом распределяются для очистки новым способом, в то время как оставшиеся $n_0 = n - n_1$ очищают стандартным способом.

Сформулируем гипотезы. Нулевая гипотеза H_0 : «разницы между новым и стандартным способами очистки нет» против односторонней альтернативы H_1 : «новый способ сокращает время очистки объекта». Таким образом, мы имеем дело с односторонним (левосторонним) критическим множеством. Протестируем нулевую гипотезу на уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Выберем в качестве тестовой статистики разность групповых средних времен очистки. Введем следующие обозначения:

r – номер рандомизации ($r=0$ – нулевая рандомизация, т. е. наблюдаемое распределение объектов по группам);

$x(r, i)$ – группа, в которую попадет i -й объект при r -й рандомизации ($x=0$ – группа объектов, очищаемых стандартным способом, $x=1$ – группа объектов, очищаемых новым способом);

$x(r=0, i)$ – группа, в которой действительно очищался i -й объект ($x=0$ – группа объектов, очищаемых стандартным способом, $x=1$ – группа объектов, очищаемых новым способом);

$y(i)$ – время, в течение которого i -й объект очищается до некоторого допустимого уровня (в секундах).

Заметим, что

$$n_0 = n - \sum_{i=1}^{i=n} x(0, i); \quad n_1 = \sum_{i=1}^{i=n} x(0, i).$$

Суммарное время очистки всех объектов в предположении истинности нулевой гипотезы не зависит от рандомизации и равно

$$\sum_{i=1}^{i=n} y(i).$$

Среднее время очистки в группе стандартного способа при r -й рандомизации равно

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i) - \sum_{i=1}^{i=n} y(i)x(r, i)}{n - \sum_{i=1}^{i=n} x(0, i)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i)(1 - x(r, i))}{n_0}.$$

Среднее время очистки в группе нового способа при r -й рандомизации равно

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i)x(r, i)}{\sum_{i=1}^{i=n} x(0, i)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i)x(r, i)}{n_1}.$$

Теперь мы можем записать выражение для тестовой статистики:

$$\begin{aligned} T(r) &= \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i)x(r, i)}{n_1} - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i)(1 - x(r, i))}{n_0} = \\ &= \frac{n_1}{\sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)} - \frac{n_0}{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i)} = \\ &= \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)}{n_1} - \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i)}{n_0} + \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i)}{n_1} \\ &\quad - \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i)}{n_1} = \\ &= \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i) + \sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)}{n_1} - \frac{(n_0 + n_1) \sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i)}{n_0 n_1} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i)}{n_1} - \frac{(n_0 + n_1)}{n_0 n_1} \boxed{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i)} \overset{\text{Статистика } 0}{=} \\ &= \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)}{n_1} - \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i)}{n_0} + \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)}{n_0} \\ &\quad - \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)}{n_0} = \\ &= \frac{(n_0 + n_1) \sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)}{n_0 n_1} - \frac{\sum_{\{i|x(r,i)=0\}} y(i) + \sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)}{n_0} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(n_0 + n_1)}{n_0 n_1} \boxed{\sum_{\{i|x(r,i)=1\}} y(i)} \overset{\text{Статистика 1}}{-} \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i)}{n_0} = \\
 &= \frac{n_0 \sum_{i=1}^{i=n} y(i)x(r,i) - n_1 \sum_{i=1}^{i=n} y(i)(1 - x(r,i))}{n_0 n_1} \\
 &= \boxed{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i) (n_0 x(r,i) - n_1 (1 - x(r,i)))}{n_0 n_1}} \overset{\text{Статистика 2}}{.}
 \end{aligned}$$

Рассмотрим три выражения в этом равенстве, обозначенные соответственно: Статистика 0, Статистика 1 и Статистика 2. В этих выражениях выделены элементы, которые зависят от рандомизации. В случае Статистика 0 в качестве статистики, эквивалентной для $T(r)$, может выступать сумма времени очистки в группе стандартного способа, но при этом тест станет правосторонним. В случае Статистика 1 в качестве эквивалентной статистики для $T(r)$ может выступать сумма времени очистки в группе нового способа, при этом тест останется левосторонним. Наконец, в случае Статистика 2 в качестве эквивалентной статистики для $T(r)$ может выступать числитель дроби, при этом тест также останется левосторонним.

3. Результаты

Рассмотрим пример применения рандомизационного теста. Пусть имеется $n = 7$ объектов, которые случайно разбили на две группы: группу стандартного способа очистки $x(r=0, i) = 0$ и группу нового способа очистки $x(r=0, i) = 1$. В группе стандартного способа $n_0 = 3$ объекта, в группе нового способа – $n_1 = 4$ объекта, $n = n_0 + n_1$. Наблюдаемое (при нулевой рандомизации) время очистки объектов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Нулевая (наблюдаемая) и первая рандомизации

Номер рандомизации, r	Номер объекта, i	Группа способа очистки, $x(r, i)$	Время очистки, $y(i)$
0	1	0	33
0	2	0	40
0	3	0	25
0	4	1	23
0	5	1	19
0	6	1	22
0	7	1	26
Ниже идут первая и следующие за ней рандомизации			
1	1	0	33
1	2	0	40
1	3	1	25
1	4	0	23
1	5	1	19
1	6	1	22
1	7	1	26
...

Наблюдаемое (при нулевой рандомизации) значение статистики равно

$$T_{obs} = T(0) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y(i) (n_0 x(0, i) - n_1 (1 - x(0, i)))}{n_0 n_1} =$$

$$= \frac{1}{12} (33 \cdot (-4) + 40 \cdot (-4) + 25 \cdot (-4) + 23 \cdot (3) + 19 \cdot (3) + 22 \cdot (3) +$$

$$+ 26 \cdot (3)) = -10,17.$$

Нулевая гипотеза утверждает, что новый способ не меняет время очистки. Следовательно, объект под номером 1, очищенный стандартным способом, например за 23 секунды, был бы очищен новым способом за те же 23 секунды. Таким образом, время очистки при нулевой гипотезе есть константа, а случайной переменной является номер группы по способу очистки, в которую может попасть объект. Поскольку разбиение на две группы с заранее фиксированными размерами групп проводилось случайно, любое разбиение имеет равную вероятность произойти. Назовем каждое такое разбиение рандомизацией. Число таких рандомизаций, включая наблюдаемую (нулевую рандомизацию), в нашем случае равно

$$\binom{n}{n_0} = \binom{n}{n_1} = C_n^{n_0} = C_n^{n_1} = \frac{n!}{(n - n_0)! n_0!} = \binom{7}{3} = \binom{7}{4} = \frac{7!}{(7 - 3)! 3!} = 35.$$

Следовательно, каждая такая рандомизация может произойти с вероятностью 1/35.

Построим все рандомизации и вычислим для каждой такой рандомизации значение статистики $T(r)$ (табл. 2).

Таблица 2. Все возможные рандомизации

Номер рандомизации, r	Стандартный способ			Новый способ				$T(r)$	Вероятность
0	33	40	25	23	19	22	26	-10,17	1/35
1	23	33	19	40	22	25	26	3,25	1/35
2	23	33	22	40	19	25	26	1,50	1/35
3	23	33	25	40	19	22	26	-0,25	1/35
4	23	33	26	40	19	22	25	-0,83	1/35
5	23	40	19	33	22	25	26	-0,83	1/35
6	23	40	22	33	19	25	26	-2,58	1/35
7	23	40	25	33	19	22	26	-4,33	1/35
8	23	40	26	33	19	22	25	-4,92	1/35
9	23	19	22	33	40	25	26	9,67	1/35
10	23	19	25	33	40	22	26	7,92	1/35
11	23	19	26	33	40	22	25	7,33	1/35
12	23	22	25	33	40	19	26	6,17	1/35
13	23	22	26	33	40	19	25	5,58	1/35
14	23	25	26	33	40	19	22	3,83	1/35
15	33	40	19	23	22	25	26	-6,67	1/35
16	33	40	22	23	19	25	26	-8,42	1/35
17	23	33	40	19	22	25	26	-9,00	1/35
18	33	40	26	23	19	22	25	-10,75	1/35
19	33	19	22	23	40	25	26	3,83	1/35
20	33	19	25	23	40	22	26	2,08	1/35
21	33	19	26	23	40	22	25	1,50	1/35
22	33	22	25	23	40	19	26	0,33	1/35
23	33	22	26	23	40	19	25	-0,25	1/35

Окончание табл. 2

Номер рандомизации, r	Стандартный способ			Новый способ				$T(r)$	Вероятность
24	33	25	26	23	40	19	22	-2,00	1/35
25	40	19	22	23	33	25	26	-0,25	1/35
26	40	19	25	23	33	22	26	-2,00	1/35
27	40	19	26	23	33	22	25	-2,58	1/35
28	40	22	25	23	33	19	26	-3,75	1/35
29	40	22	26	23	33	19	25	-4,33	1/35
30	40	25	26	23	33	19	22	-6,08	1/35
31	19	22	25	23	33	40	26	8,50	1/35
32	19	22	26	23	33	40	25	7,92	1/35
33	19	25	26	23	33	40	22	6,17	1/35
34	22	25	26	23	33	40	19	4,42	1/35

P -значение теста рандомизации H_0 $pvalue$ может быть рассчитано как вероятность получить статистику теста столь же экстремальную или более экстремальную (в пользу H_1), чем наблюдаемая статистика теста $T(0)$.

Выбор способа очистки случаен, следовательно, все рандомизации равновероятны:

$$pvalue = \mathbf{P}\{T(r) \leq T(0)|H_0\} = \frac{\sum_{r=0}^{\binom{n}{n_0}-1} I(T(r) \leq T(0))}{\binom{N}{n_0}} = \frac{\sum_{r=0}^{\binom{n}{n_0}-1} I(T(r) \leq T(0))}{\frac{n!}{(n-n_0)!n_0!}},$$

где $I()$ – индикаторная функция.

Вычислим эту вероятность.

$$pvalue = \mathbf{P}\{T(r) \leq T(0)|H_0\} = \frac{\sum_{r=0}^{\binom{n}{n_0}-1} I(T(r) \leq T(0))}{\binom{n}{n_0}} = \frac{2}{35} = 0,057.$$

Поскольку p -значение = 0,057 > $\alpha = 0,05$, тест не отклоняет нулевую гипотезу. Этот результат, в частности, можно интерпретировать так: новый способ не дает статистически значимого преимущества во времени очистки перед стандартным способом.

Построим функцию распределения тестовой статистики T при условии H_0 :

$$F(t|H_0) = \mathbf{P}\{T \leq t|H_0\}.$$

Поскольку все рандомизации попарно несовместны, можно сгруппировать одинаковые значения статистики T и сложить соответствующие им вероятности. Прделав это, получим таблицу распределения вероятностей по отсортированным значениям тестовой статистики (табл. 3).

Таблица 3. Распределение вероятностей по значениям тестовой статистики

Значение тестовой статистики, t	Вероятность, $p(t)$	Функция распределения, $F(t)$
-10,750	0,0286	0,0286
-10,167	0,0286	0,0571
-9,000	0,0286	0,0857
-8,417	0,0286	0,1143
-6,667	0,0286	0,1429

Окончание табл. 3

Значение тестовой статистики, t	Вероятность, $p(t)$	Функция распределения, $F(t)$
-6,083	0,0286	0,1714
-4,917	0,0286	0,2000
-4,333	0,0571	0,2571
-3,750	0,0286	0,2857
-2,583	0,0571	0,3429
-2,000	0,0571	0,4000
-0,833	0,0571	0,4571
-0,250	0,0857	0,5429
0,333	0,0286	0,5714
1,500	0,0571	0,6286
2,083	0,0286	0,6571
3,250	0,0286	0,6857
3,833	0,0571	0,7429
4,417	0,0286	0,7714
5,583	0,0286	0,8000
6,167	0,0571	0,8571
7,333	0,0286	0,8857
7,917	0,0571	0,9429
8,500	0,0286	0,9714
9,667	0,0286	1,0000

Теперь, используя построенную функцию рандомизационного распределения тестовой статистики в предположении H_0 , вычислим одностороннее (в нашем случае – левостороннее) p -значение (рис. 1):

$$pvalue = F(T_{obs}|H_0) = 0,057.$$

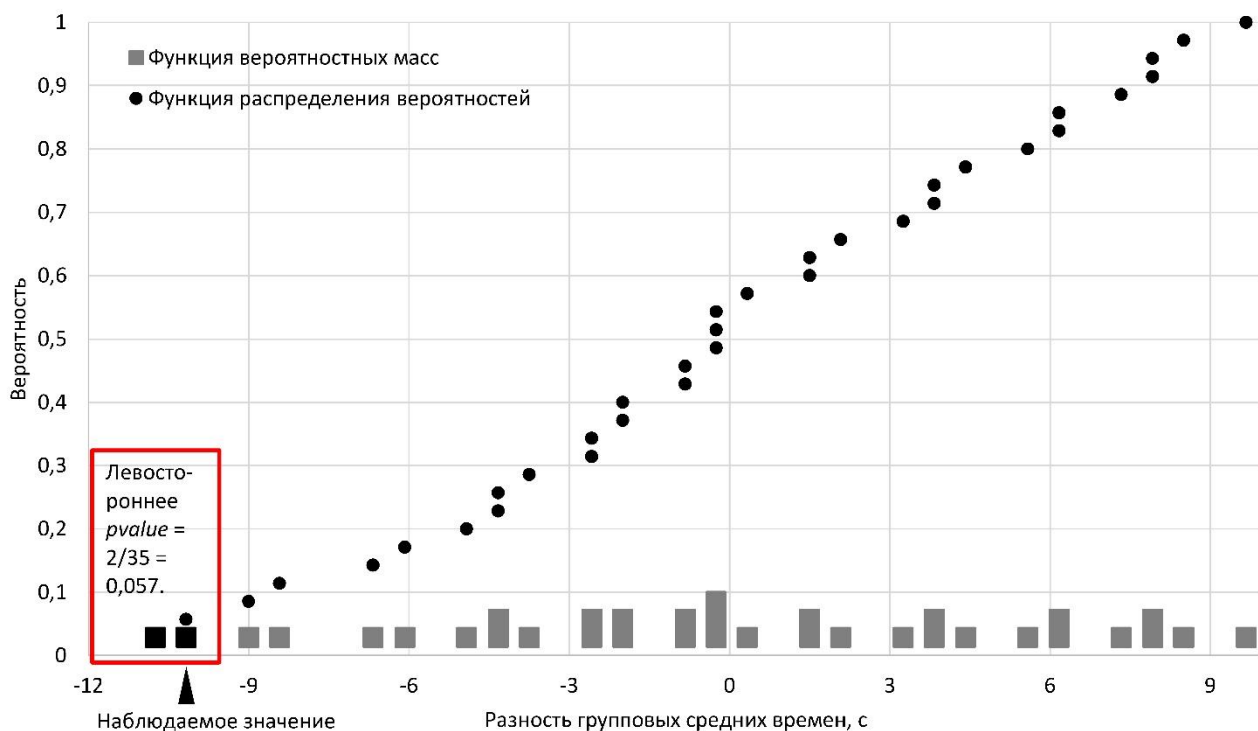


Рис. 1. Левосторонний тест

Рассмотрим случай, когда в качестве тестовой статистики $T(r)$ выступает сумма времен очистки в группе стандартного способа (рис. 2). В этом случае тест станет

правосторонним, а функция вероятностных масс будет зеркально симметрична той, что мы наблюдали в левостороннем случае (рис. 1). При этом p -значение также станет правосторонним.

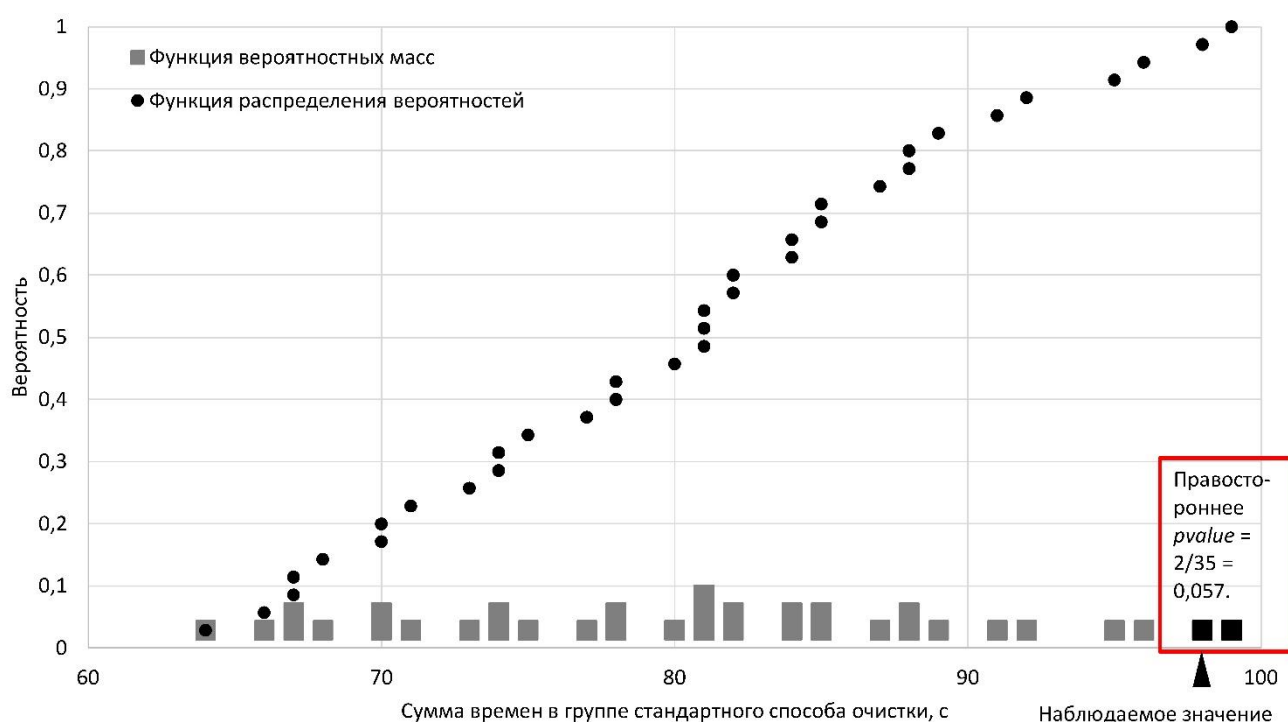


Рис. 2. Правосторонний тест

Рандомизационное распределение дискретно, поэтому p -значение кратно $1/35$, но не каждое кратное значение возможно. В нашем примере достижимые p -значения равны $k/35$, где $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 16, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 35$ (их всего 25 штук). Если уровень значимости равен одному из достижимых p -значений $\alpha = k/35$, тогда

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\{\text{Type I error}\} &= \mathbf{P}\{pvalue \leq \alpha | H_0\} = \mathbf{P}\left\{\sum_{r=0}^{\binom{N}{n_0}-1} I(T(r) \leq T(0)) \leq k \mid H_0\right\} = \\ &= \frac{k}{\binom{N}{n_0}} = \alpha. \end{aligned}$$

Рандомизационный тест H_0 есть точный тест, если выбранный уровень значимости равен одному из достижимых p -значений.

Рандомизационный тест H_0 есть консервативный тест, если выбранный уровень значимости не равен ни одному из достижимых p -значений, а

$$\mathbf{P}\{\text{Type I error}\} = \frac{k}{\binom{N}{n_0}} = \frac{k}{\frac{n!}{(n-n_0)!n_0!}} = k \frac{(n-n_0)!n_0!}{n!} < \alpha$$

является наибольшим достижимым p -значением меньшим α .

Рандомизационный тест гарантированно контролирует вероятность ошибки первого рода при условии рандомизации объектов по способу очистки. Другими словами, каждому объекту случайно должен быть назначен один из двух способов очистки.

4. Обсуждение

Пермутационные методы обладают рядом свойств, которые делают их привлекательной альтернативой традиционным статистическим методам при решении многих исследовательских задач [15, 16].

Во-первых, пермутационные методы не требуют предварительных знаний о распределениях и допущений, связанных с параметрическим тестом, таким как, например, дисперсионный анализ, который предполагает нормальность распределения и однородность дисперсии. Это, однако, не означает, что неоднородность дисперсии не влияет на результаты применения пермутационных методов. Также сложность, связанная с применениями традиционных статистических тестов, возникает, когда меньшая из выборок обладает большей дисперсией. Это увеличивает риск отклонения нулевой гипотезы, когда она на самом деле верна, иными словами, потенциально увеличивает вероятность ошибки первого рода.

Во-вторых, пермутационные методы могут быть построены как аналоги большого количества традиционных параметрических тестов. Это могут быть, например, все разновидности t - и F -тестов, простая и множественная регрессия, а также всевозможные меры ассоциации [17, 18].

В-третьих, пермутационные методы успешно применяются в исследованиях, в которых случайно или в соответствии с авторским экспериментальным дизайном получены небольшие наборы экспериментальных данных. Например, небольшое число наблюдений характерно для лонгитюдного исследования, в начале которого число участников было достаточно большим, а к концу – большая доля по каким-либо причинам выбыла из эксперимента. Еще один пример – пилотное исследование с небольшим количеством участников для установления работоспособности методики исследования до проведения основного экспериментального этапа. Пермутационные методы продуктивны в исследовательских ситуациях с небольшим числом наблюдений, в то время как традиционные статистические тесты в таких случаях оказываются ненадежными.

В настоящей работе применение пермутационного подхода показано на примере непараметрического рандомизационного теста для сравнения выраженности признака в двух группах. Недостаток рандомизационного теста заключается в том, что он полностью зависит от набора наблюдаемых данных, для которых он применяется. Таким образом, полученные выводы могут быть сделаны только относительно рассматриваемой группы наблюдений и не могут быть автоматически распространены на популяцию в целом. Тем не менее рандомизационный тест остается полезным, так как позволяет сделать оценку на малом количестве наблюдений, а также обосновать и сформулировать план дальнейших исследований уже на случайной выборке из популяции.

5. Выводы

1. Рассмотренный в настоящей работе непараметрический рандомизационный тест дает исследователю большую свободу выбора тестовой статистики, с помощью которой оцениваются экспериментальные условия.

2. Непараметрический рандомизационный тест не требует предварительных знаний о распределениях и допущений, характерных для параметрических тестов.

3. Непараметрический рандомизационный тест может быть применен к самым различным данным, в т. ч. к данным, содержащим малое число наблюдений, а также к данным, не являющимся реализацией случайной выборки.

6. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития

Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

7. Список литературы

1. *Fisher, R. A.* Statistical methods for research workers / R. A. Fisher. – Edinburgh, Scotland. – Oliver and Boyd, 1925. – 232 p.
2. *Fisher, R. A.* The arrangement of field experiments / R. A. Fisher // Journal of the American Statistical Association. – 1926. – Vol. 33. – P. 503–513.
3. *Fisher, R. A.* The design of experiments / R. A. Fisher. – Edinburgh, Scotland England. – Oliver and Boyd, 1935. – 252 p.
4. *Ernst, M. D.* Permutation Methods: A Basis for Exact Inference / M. D. Ernst // Statistical Science. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 676–685. – DOI: 10.1214/088342304000000396.
5. *Fişek, M. H.* Permutation tests for goodness-of-fit testing of mathematical models to experimental data / M. H. Fişek, Z. Barlas // Social Science Research. – 2013. – Vol. 42, Iss. 2. – P. 482–495. – DOI: 10.1016/j.ssresearch.2012.09.010.
6. *Ross, S. M.* Simulation, bootstrap statistical methods, and permutation tests / S. M. Ross // Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists. – Amsterdam. – Academic Press; Elsevier, 2021. – P. 619–647. – DOI: 10.1016/B978-0-12-824346-6.00024-7.
7. *Taylor, A. B.* Four applications of permutation methods to testing a single-mediator model / A. B. Taylor, D. P. MacKinnon // Behavior Research Methods. – 2012. – Vol. 44, Iss. 3. – P. 806–844. – DOI: 10.3758/s13428-011-0181-x.
8. *Barry, W. T.* Significance analysis of functional categories in gene expression studies: a structured permutation approach / W. T. Barry, A. B. Nobel, F. A. Wright // Bioinformatics. – 2005. – Vol. 21, Iss. 9. – P. 1943–1949. – DOI: 10.1093/bioinformatics/bti260.
9. *Berry, K. J.* A Primer of Permutation Statistical Methods / K. J. Berry, J. E. Johnston, P. W. Mielke. – Cham, Switzerland. – Springer-Verlag, 2019. – 476 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-20933-9.
10. An efficient image encryption scheme using gray code based permutation approach / J. Chen, Z. Zhu, C. Fu [et al.] // Optics and Lasers in Engineering. – 2015. – Vol. 67. – P. 191–204. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2014.11.017.
11. Применение перестановочного метода к оценке прогностической способности моделей пространственного распределения концентраций меди и железа в верхнем слое почвы / А. П. Сергеев, А. С. Буторова, А. В. Шичкин [и др.] // Геоинформатика. – 2022. – № 2. – С. 42–53. – DOI: 10.47148/1609-364X-2022-2-42-53.
12. *Edgington, E. S.* Randomization Tests, 3rd ed. / E. S. Edgington. – Dekker, New York, 1995. – 376 p.
13. *Lehmann, E. L.* Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks / E. L. Lehmann. – Holden–Day, San Francisco, 1975. – 480 p.
14. *Berry, K. J.* Permutation statistical methods: An integrated approach / K. J. Berry, P. W. Mielke, J. E. Johnston. – Cham, Switzerland. – Springer-Verlag, 2016. – 642 p.
15. Permutation methods. Part II / K. J. Berry, J. E. Johnston, P. W. Mielke, L. A. Johnston // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. – 2018. – Vol. 10, Iss. 3. – e1429. – DOI: 10.1002/wics.1429.
16. *Mielke, P. W.* Permutation Methods. A Distance Function Approach / P. W. Mielke, K. J. Berry. – New York. – Springer, 2001. – DOI:10.1007/978-1-4757-3449-2.
17. *Goodman, L. A.* Measures of association for cross classifications / L. A. Goodman, W. H. Kruskal // Journal of the American Statistical Association. – 1954. – Vol. 49, № 268. – P. 732–764.
18. *Kończak, G.* Applications of Permutation Methods in the Analysis of Associations / G. Kończak // Argumenta Oeconomica Cracoviensia. – 2020. – No 1(22). – P. 31–45. – DOI: 10.15678/AOC.2020.2203.

Сведения об авторах:

Сергеев Александр Петрович, к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией физики и экологии Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; доцент, заведующий лабораторией искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: aleksandrpsergeev@gmail.com.

Буторова Анастасия Сергеевна, младший научный сотрудник лаборатории физики и экологии Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; аспирант, младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Корюкин Егор Александрович, аспирант, лаборант-исследователь лаборатории искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Бобаков Вениамин Сергеевич, студент, лаборант-исследователь лаборатории искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Павлова Светлана Вячеславовна, младший научный сотрудник лаборатории искусственного интеллекта Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

NONPARAMETRIC RANDOMIZATION TEST: IDEA, ALGORITHM, ADVANTAGES, DISADVANTAGES AND APPLICATION EXAMPLE

A. P. Sergeev ¹, A. S. Butorova ^{1,2}, E. A. Koryukin ², V. S. Bobakov ², S. V. Pavlova ²

¹ *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*

² *Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia*

The permutation approach has a number of advantages over traditional parametric statistical methods, which makes it preferable for data processing in some research situations. Permutational methods do not use the assumptions about the shape of the probability distribution; they are suitable for small data sets and give the researcher great freedom in choosing test statistics. This paper is devoted to the use of one of the variants of permutation methods – a nonparametric randomization test. The authors outline the premises of the randomization test and provide some formalizations for the case of comparing two groups of observations. An application example of a randomization test to test a statistical hypothesis about the equality of the intergroup difference in means to zero in cases of right- and left-sided critical sets is considered. The example compares the performance of two purification methods – standard and new ones. In the right-sided case, the test statistic is the sum of purification times in the group of the standard method; in the left-sided case, it is the intergroup difference in mean purification times. Using a randomization test, it was shown that the new purification method does not provide a statistically significant advantage in purification time over the standard method.

Key words: permutation approach; randomization test; permutation; statistical hypothesis testing; type I error; type II error; *p*-value.

References

1. Fisher, R. A. Statistical methods for research workers / R. A. Fisher. – Edinburgh, Scotland. – Oliver and Boyd, 1925. – 232 p.
2. Fisher, R. A. The arrangement of field experiments / R. A. Fisher // Journal of the American Statistical Association. – 1926. – Vol. 33. – P. 503–513.
3. Fisher, R. A. The design of experiments / R. A. Fisher. – Edinburgh, Scotland England. – Oliver and Boyd, 1935. – 252 p.
4. Ernst, M. D. Permutation Methods: A Basis for Exact Inference / M. D. Ernst // Statistical Science. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 676–685. – DOI: 10.1214/088342304000000396.
5. Fişek, M. H. Permutation tests for goodness-of-fit testing of mathematical models to experimental data / M. H. Fişek, Z. Barlas // Social Science Research. – 2013. – Vol. 42, Iss. 2. – P. 482–495. – DOI: 10.1016/j.ssresearch.2012.09.010.
6. Ross, S. M. Simulation, bootstrap statistical methods, and permutation tests / S. M. Ross // Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists. – Amsterdam. – Academic Press; Elsevier, 2021. – P. 619–647. – DOI: 10.1016/B978-0-12-824346-6.00024-7.
7. Taylor, A. B. Four applications of permutation methods to testing a single-mediator model / A. B. Taylor, D. P. MacKinnon // Behavior Research Methods. – 2012. – Vol. 44, Iss. 3. – P. 806–844. – DOI: 10.3758/s13428-011-0181-x.
8. Barry, W. T. Significance analysis of functional categories in gene expression studies: a structured permutation approach / W. T. Barry, A. B. Nobel, F. A. Wright // Bioinformatics. – 2005. – Vol. 21, Iss. 9. – P. 1943–1949. – DOI: 10.1093/bioinformatics/bti260.
9. Berry, K. J. A Primer of Permutation Statistical Methods / K. J. Berry, J. E. Johnston, P. W. Mielke. – Cham, Switzerland. – Springer-Verlag, 2019. – 476 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-20933-9.
10. An efficient image encryption scheme using gray code based permutation approach / J. Chen, Z. Zhu, C. Fu [et al.] // Optics and Lasers in Engineering. – 2015. – Vol. 67. – P. 191–204. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2014.11.017.

11. Application of the permutation method to the assessment of predictive ability of the models of spatial distribution of copper and iron concentrations in the topsoil / A. P. Sergeev, A. S. Butorova, A. V. Shichkin [et al.] // *Geoinformatika*. – 2022. – № 2. – P. 42–53. – DOI: 10.47148/1609-364X-2022-2-42-53.
12. *Edgington, E. S.* Randomization Tests, 3rd ed. / E. S. Edgington. – Dekker, New York, 1995. – 376 p.
13. *Lehmann, E. L.* Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks / E. L. Lehmann. – Holden–Day, San Francisco, 1975. – 480 p.
14. *Berry, K. J.* Permutation statistical methods: An integrated approach / K. J. Berry, P. W. Mielke, J. E. Johnston. – Cham, Switzerland. – Springer-Verlag, 2016. – 642 p.
15. Permutation methods. Part II / K. J. Berry, J. E. Johnston, P. W. Mielke, L. A. Johnston // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. – 2018. – Vol. 10, Iss. 3. – e1429. – DOI: 10.1002/wics.1429.
16. *Mielke, P. W.* Permutation Methods. A Distance Function Approach / P. W. Mielke, K. J. Berry. – New York. – Springer, 2001. – DOI:10.1007/978-1-4757-3449-2.
17. *Goodman, L. A.* Measures of association for cross classifications / L. A. Goodman, W. H. Kruskal // *Journal of the American Statistical Association*. – 1954. – Vol. 49, № 268. – P. 732–764.
18. *Kończak, G.* Applications of Permutation Methods in the Analysis of Associations / G. Kończak // *Argumenta Oeconomica Cracoviensia*. – 2020. – No 1(22). – P. 31–45. – DOI: 10.15678/AOC.2020.2203.

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕРТНОСТИ ДЕТЕЙ ОТ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ, ПОДВЕРГШИХСЯ РАДИОАКТИВНОМУ И ХИМИЧЕСКОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

А. А. Живодеров, Л. Г. Коньшина

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

На радиоактивно загрязненных территориях Челябинской области в результате деятельности ПО «Маяк» существенно повышен уровень детской онкологической смертности. Целью исследования было изучение статистических показателей детской смертности от онкологических заболеваний на рассматриваемых территориях и выявление влияния на нее выбросов радиоактивных и химических загрязнителей. Для обработки данных были применены методы математической статистики, такие как дисперсионный анализ, построение доверительных интервалов для отношений шансов, вычисление коэффициентов ранговой корреляции. По результатам проведенного исследования можно констатировать, что в период с 1947 до 1976 г. существует значимое ($p < 0,1$) влияние фактора близости территории к ПО «Маяк» на уровень смертности детей от онкологических заболеваний. В период после 1976 г. такое влияние достоверно не обнаруживается, зато выявляется значимая ($p < 0,1$) корреляция уже между степенью близости территории к Аргаяшской ТЭЦ и уровнем онкологической смертности детей. До 1976 г. такая корреляция не проявлялась. На исследованных территориях Челябинской области за время наблюдения произошло значительное перераспределение величины детской смертности от онкологических заболеваний. Если в период до 1976 г. максимальная смертность наблюдалась в районах, прилегающих к ПО «Маяк», то в период после 1976 г. – на территориях вблизи Аргаяшской ТЭЦ. Выявлена большая чувствительность к воздействию факторов риска развития онкологических заболеваний у мальчиков по сравнению с девочками. Наряду с хроническим радиационным воздействием показана существенная роль химической канцерогенной нагрузки в росте детской онкологической смертности.

Ключевые слова: статистический анализ; дети; смертность; злокачественные новообразования.

1. Введение

Часть территории Челябинской области с конца 1940-х до конца 1960-х гг. была значительно загрязнена радиоактивными веществами, выбрасываемыми производственным объединением (ПО) «Маяк». Кроме того, с конца 1940-х по 1952 г. имели место практически неконтролируемые сбросы радиоактивных веществ в р. Течу. Нельзя не упомянуть о находящейся поблизости мощной Аргаяшской ТЭЦ (построена в 1954 г.), расположенной в п. Новогорном. В 1960–1990-е гг. выбросы вредных веществ Аргаяшской ТЭЦ достигали 50 тыс. т в год, и она находилась на 6 месте среди наиболее мощных источников загрязнения воздушного бассейна среди предприятий Челябинской области. В северной части области Аргаяшская ТЭЦ является самым крупным загрязнителем атмосферного воздуха. В ее выбросах на протяжении всего периода работы с использованием бурых углей присутствовали такие канцерогены, как бериллий, хром-VI, бенз/а/пирен, кобальт, мышьяк, никель, свинец, формальдегид. О несомненном влиянии Аргаяшской ТЭЦ на рост онкологической смертности детей говорят результаты исследования, согласно которым в 1990-х гг. канцерогенный риск для детского населения на расстоянии от одного до пяти километров от труб предприятия составлял $1,4 \cdot 10^{-2}$ и расценивался как очень высокий и неприемлемый [1]. Логично предположить, что и на территории

Аргаяшского района также имел место значительный канцерогенный риск не только в 1990-е гг., но и в течение всего периода эксплуатации ТЭЦ.

Детский возраст, в силу физиологических особенностей, отличается наиболее высокой радиочувствительностью. Латентный период вызванных облучением злокачественных новообразований (ЗН) может быть довольно небольшим. Минимальный латентный период развития лейкозий может составлять 1–2 года [2]. Радиационно-обусловленные солидные раки возникают уже спустя 2–5 лет после радиационных аварий [3]. Есть сведения о росте детской смертности от ЗН в первое 10-летие после радиационных инцидентов в ряде районов Оренбургской (испытание на Тоцком полигоне) и Свердловской областей [4, 5]. Показана повышенная заболеваемость и смертность детей от злокачественных новообразований костей, центральной нервной системы, органов пищеварения, мочевых органов, лейкозов, лимфолейкозов в ряде областей России, граничащих с Украиной и Белоруссией, в первые 5–7 лет после аварии на ЧАЭС [6]. В радиоактивно-загрязненных районах Челябинской области максимальная гибель детей от ЗН имела место в г. Касли, Аргаяшском и Каслинском районах [7].

2. Цель исследования

Изучение статистических показателей детской смертности от онкологических заболеваний на рассматриваемых территориях и выявление влияния на нее выбросов радиоактивных и химических загрязнителей.

3. Материалы и методы

В настоящей работе проводились исследования смертности детей от онкологических заболеваний на территориях Челябинской области, подвергшихся загрязнению радиоактивными веществами в середине прошлого века, с использованием данных о детской смертности, опубликованных в наших предыдущих статьях [7, 8]. Детская смертность изучалась за 50-летний период с 1947 по 1996 г. в Касли и Кыштым, и Каслинском, Аргаяшском, Кунашакском и Красноармейском районах (анализировались только населенные пункты, включенные в Федеральную целевую программу «Социальная и радиационная реабилитации населения и территорий Уральского региона, пострадавших вследствие деятельности производственного объединения "Маяк", на период до 2000 года»). Источником информации служили «Актовые записи о смерти» детей, хранящиеся в архивах областного ЗАГСа Челябинской области. Изучались исключительно только те населенные пункты, которые оказались в зоне радиоактивного загрязнения (полученные дозы превышали 7 сЗв), а также в поселках, куда массово отселяли людей. В качестве контрольных территорий использовались усредненные данные по трем сельским районам Челябинской области: Увельскому, Брединскому, Чебаркульскому и по трем городам: Чебаркулю, Усть-Катаву, Нязепетровску, не попавших в зону радиоактивного загрязнения. Выбор контрольных территорий определялся также сопоставимостью по уровню медицинского обслуживания, национальному составу, характеристикам социально-экономического развития, климатическим характеристикам. Из архивных материалов выписывались: пол, год смерти, год рождения, место рождения, причина смерти. Всего проанализировано около 25 000 актовых записей о смерти. Сведения разрабатывались по полу, возрасту, основной причине наступления смерти, адресу. Вычисленные относительные показатели смертности стандартизовались. Нельзя не отметить, что за изучаемый период значительно изменился уровень жизни и медицинского обслуживания населения, однако это происходило параллельно как на загрязненных, так и на контрольных территориях.

Для обработки данных были применены методы математической статистики, такие как дисперсионный анализ, построение доверительных интервалов для

отношений шансов, вычисление коэффициентов ранговой корреляции [9,10]. Исследовалось распределение величины детской смертности от онкологических заболеваний по территориям и ее изменения со временем для выявления влияния деятельности промышленных предприятий на распространенность онкологических заболеваний. Время наблюдения за уровнем детской смертности от онкологических заболеваний было разделено на два периода: 1-й – с 1947 по 1976 г.; 2-й – с 1977 по 1996 г. Эти периоды существенно различаются по уровню и характеру поступления радиоактивных загрязнений от ПО «Маяк» в окружающую среду. В первый период происходили значительные выбросы радиоактивных веществ с территории комбината как в процессе его штатной работы, так и в результате нескольких аварийных инцидентов. Это было связано с несовершенством используемых технологий и систем безопасности предприятия. Во второй период, после модернизации технологического процесса, выбросы радиоактивных веществ радикально уменьшились и крупных аварийных ситуаций больше не возникало. В настоящее время уровень выбросов не превышает фоновых значений [11]. Нами были рассчитаны средние значения детской смертности от онкологических заболеваний за каждый из этих периодов по всем изучаемым территориям.

4. Результаты и обсуждение

Была поставлена задача определить влияние фактора проживания на определенной территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению со стороны ПО «Маяк», на уровень детской смертности от онкологических заболеваний. Для решения такого рода задач эффективно применение методов дисперсионного анализа, однако эти методы требуют наличия нормального распределения у исследуемой количественной переменной. Величина смертности не имеет нормального распределения, но вместе с тем логарифм смертности, как выяснилось, имеет распределение, близкое к нормальному (по критерию Пирсона). Поэтому для построения моделей дисперсионного анализа мы использовали именно эту величину. На рис. 1–3 приведены результаты дисперсионного анализа для логарифма детской смертности от злокачественных новообразований по изучаемым территориям Челябинской области для всех детей в целом и отдельно для мальчиков и девочек в периоды до 1976 г. и после 1976 г. В заголовке каждой диаграммы приведены соответствующие p -значения. Цифрами обозначены: 1 – Каслинский район (0 км), 2 – г. Касли (12 км), 3 – г. Кыштым (14 км), 4 – Аргаяшский район (30 км), 5 – Кунашакский район (50 км), 6 – Красноармейский район (80 км). Территории пронумерованы в порядке удаления от источника радиоактивных загрязнений (ПО «Маяк»). В скобках указаны минимальные расстояния от предприятия до пронумерованной территории (0 км означает, что предприятие расположено непосредственно на этой территории).

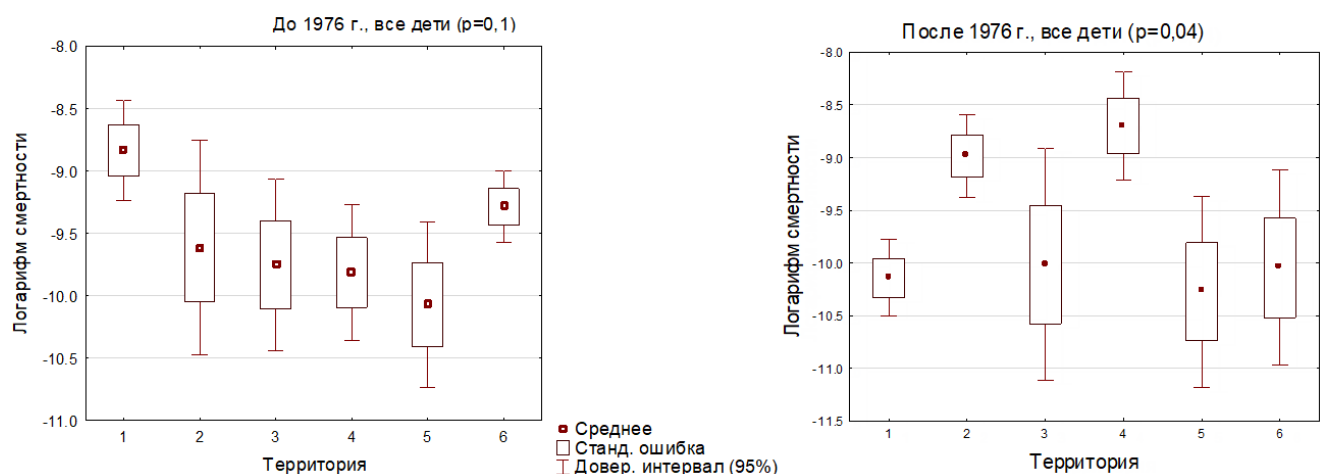


Рис. 1. Детская смертность (логарифм) от онкологических заболеваний

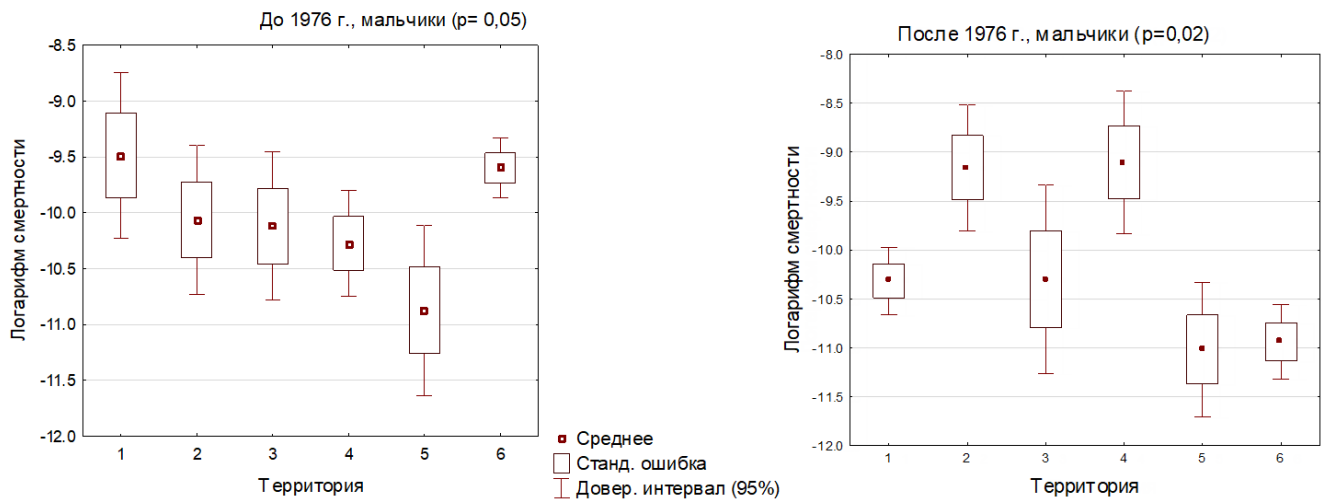


Рис. 2. Смертность мальчиков (логарифм) от онкологических заболеваний

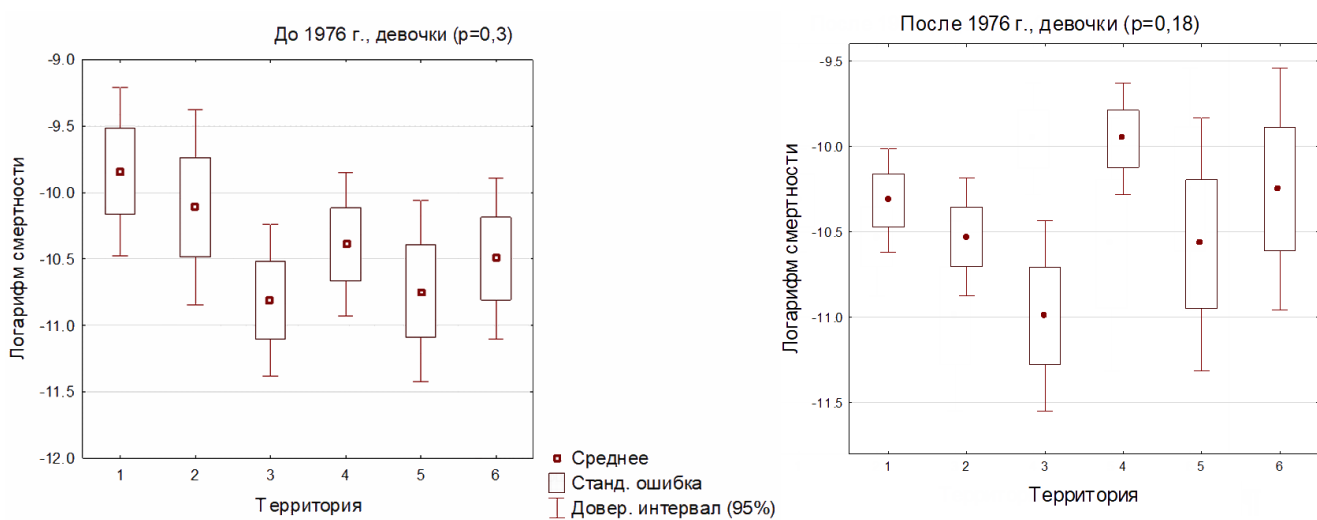


Рис. 3. Смертность девочек (логарифм) от онкологических заболеваний

Как видно из диаграмм, имеются статистически значимые (как минимум на уровне $p < 0,1$) различия уровней смертности на исследованных территориях. В период до 1976 г. прослеживается явная тенденция к уменьшению уровня смертности детей с удалением загрязненного района от ПО «Маяк», исключение составляет только Красноармейский район, по которому протекает р. Теча, куда в 40-е и 50-е гг. прошлого века производился плановый слив жидких радиоактивных отходов ПО «Маяк». В период после 1976 г. никакой зависимости логарифма детской смертности от расстояния от комбината «Маяк» не наблюдается. Максимальные значения логарифма детской смертности в период до 1976 г. обнаружены в Каслинском районе, расположенном вплотную к промышленной площадке комбината, а в период после 1976 г. – в Аргаяшском районе, находящемся на значительном от него удалении. Возможно, полученные результаты указывают на то, что факторы риска, связанные с выбросами радиоактивных веществ с территории ПО «Маяк» после 1976 г., перестали играть определяющую роль в возникновении онкологических заболеваний.

Рост смертности от онкологических заболеваний в Аргаяшском районе в период после 1976 г. может быть связан с выбросами Аргаяшской ТЭЦ. Эта станция имеет достаточно большую энергетическую мощность (около 1 ГВт по сумме электрической и тепловой энергии) и использует в качестве топлива в т. ч. бурые угли.

Из диаграмм также видно, что различия в уровне смертности по территориям более значимы для мальчиков, чем для девочек.

Для более детального изучения зависимости уровня смертности детей от

онкологических заболеваний по территориям Челябинской области были вычислены отношения шансов смерти по сравнению с контрольными значениями. Для всех исследованных территорий и групп детского населения были вычислены соответствующие отношения шансов и доверительные интервалы для этих отношений. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение детской смертности от онкологических заболеваний с контрольными значениями. Отношения шансов и доверительные интервалы

	Каслинский р-н	г. Касли	г. Кыштым	Аргаяшский р-н	Кунашакский р-н	Красноармей- ский р-н
Близость к ПО «Маяк» (ранг)	1	2	3	4	5	6
Близость к Аргаяшской ТЭЦ (ранг)	3	4	2	1	5	6
До 1976 г.	3,75 (0,72– 17,69) (1,06– 14,86)*	2,64 (0,42– 4,18)	1,78 (0,36– 8,63)	1,44 (0,21– 10,17)	1,21 (0,24– 5,97)	2,18 (0,43– 11,04)
Ранг	1	2	4	5	6	3
После 1976 г.	0,63 (0,03– 13,66)	3,09 (0,54– 17,41)	1,28 (0,24– 6,86)	4,11 (0,83– 20,4) (1,08– 16,77)*	1,00 (0,15– 3,45)	1,19 (0,16– 8,58)
Ранг	6	2	3	1	5	4
До 1976 г., мальчики	6,35 (0,49– 82,3)	3,46 (0,2– 58,8)	3,67 (0,3– 44,94)	2,36 (0,11– 47<3)	2,27 (0,16– 31,4)	4,71 (0,37– 59,18)
Ранг	1	4	3	5	6	2
После 1976 г., мальчики	0,95 (0,01– 88,37)	4,25 (0,33– 54,62)	2,89 (0,21– 38,17)	8,92 (0,72– 109,8) (1,08– 73,38)*	1,00 (0,04– 24,54)	0,51 (0,005– 47,19)
Ранг	5	2	3	1	4	6
До 1976 г., девочки	2,17 (0,25– 18,8)	1,85 (0,2– 18,8)	0,82 (0,08– 7,94)	1,18 (0,09– 14,87)	1,55 (0,19 – 12,06)	1,04 (0,1– 10,72)
Ранг	1	2	6	4	3	5
После 1976 г., девочки	0,47 (0,007– 32,98)	0,38 (0,005– 26,6)	0,57 (0,004– 7,26)	4,46 (0,64– 30,87)	1,00 (0,1– 9,61)	1,27 (0,11– 13,7)
Ранг	5	6	4	1	3	2

*- $p < 0,1$.

Как видно из табл. 1, наибольшее превышение смертности над контролем до 1976 г. наблюдалось в Каслинском районе, а после 1976 г. – в Аргаяшском. Для статистически значимых (на уровне значимости $p < 0,1$) превышений в таблице приведены 95- и 90-процентные доверительные интервалы, а для всех остальных отношений шансов только 95- процентные доверительные интервалы. Можно видеть также, что уровень смертности у мальчиков, как правило, выше, чем у девочек.

Далее проведено ранжирование исследованных территорий по степени их близости к источнику радиоактивных загрязнений (ПО «Маяк») и по уровню смертности детей от онкологических заболеваний на них. Соответствующие ранги приведены в табл. 1. По этим рангам вычислены коэффициенты ранговой корреляции Спирмена [10] между фактором близости территории к источнику радиоактивных загрязнений и уровнем смертности детей на ней в периоды до 1976 г. и после 1976 г. Эти коэффициенты и p -значения для них приведены в табл.2.

Таблица 2. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для зависимостей детской смертности от степени близости территории к источнику радиоактивных загрязнений (ПО «Маяк»)

	До 1976 г.		После 1976	
	Spearman - R	p-значение	Spearman - R	p-значение
Все дети	0,66	0,09	-0,08	0,9
мальчики	0,37	0,4	0,25	0,6
девочки	0,60	0,2	-0,77	0,07

По значениям коэффициентов Спирмена можно видеть, что в период до 1976 г. существует статистически значимая ($p < 0,1$) ранговая корреляция между степенью близости территории к ПО «Маяк» и уровнем смертности детей от онкологических заболеваний на этой территории. В период после 1976 г. такая корреляция отсутствует или даже в некоторых случаях становится обратной, как например для девочек. В этих случаях, по-видимому, сказывается влияние каких-то иных факторов риска развития онкологических заболеваний, возможно, выбросов химических канцерогенов другими предприятиями.

Для проверки предположения о влиянии в период после 1976 г. выбросов продуктов сжигания бурого угля Аргаяшской ТЭЦ на детскую онкологическую смертность мы провели ранжирование исследованных территорий по степени их близости к Аргаяшской ТЭЦ. Ранги также показаны в табл. 1. Были вычислены соответствующие коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, которые приведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для зависимостей детской смертности от степени близости территории к Аргаяшской ТЭЦ

	До 1976 г.		После 1976 г.	
	Spearman - R	p-значение	Spearman - R	p-значение
Все дети	-0,14	0,8	0,71	0,09
мальчики	-0,25	0,6	0,88	0,02
девочки	-0,14	0,8	0,03	0,95

По этим данным видно, что в период после 1976 г. существует статистически значимая ($p < 0,1$) ранговая корреляция уже между степенью близости территории к Аргаяшской ТЭЦ и уровнем онкологической смертности детей. В период до 1976 г. такая корреляция отсутствует. Корреляционные эффекты более выраженными оказались для мальчиков.

Для более наглядной демонстрации полученного эффекта мы перестроили диаграммы дисперсионного анализа, приведенные на рис.1–3, перенумеровав исследованные территории Челябинской области в порядке удаления от Аргаяшской ТЭЦ (рис. 4–6). Цифрами на диаграммах обозначены: 1 – Аргаяшский район (0 км), 2 – г. Кыштым (25 км), 3 – Каслинский район (35 км), 4 – г. Касли (45 км), 5 – Кунашакский район (50 км), 6 – Красноармейский район (80 км). В скобках указаны минимальные расстояния от предприятия до пронумерованной территории (0 км означает, что предприятие расположено непосредственно на этой территории).

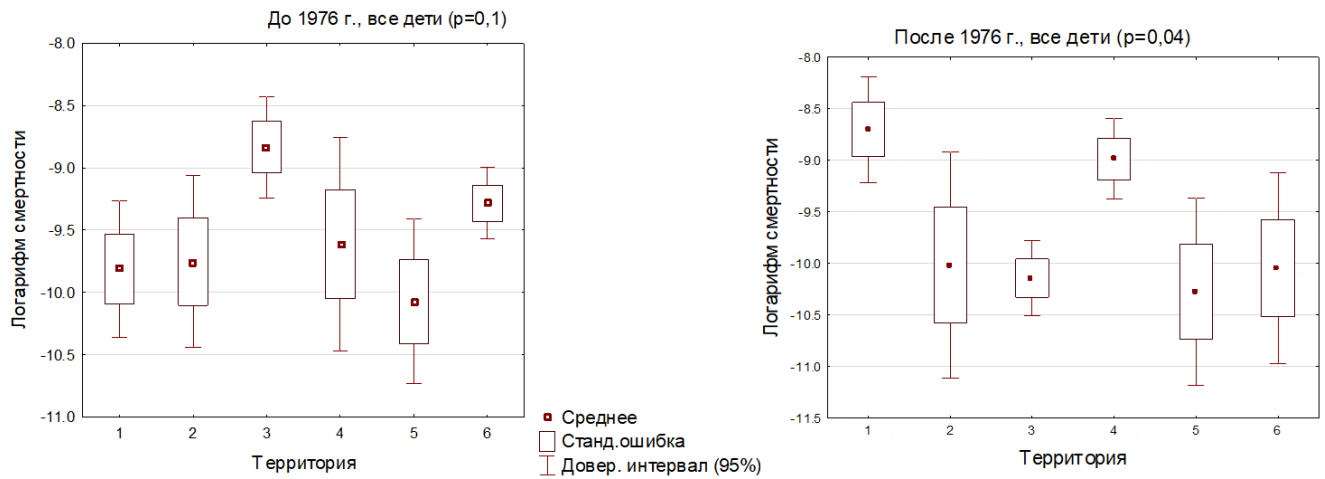


Рис. 4. Детская смертность (логарифм) от онкологических заболеваний по территориям Челябинской области

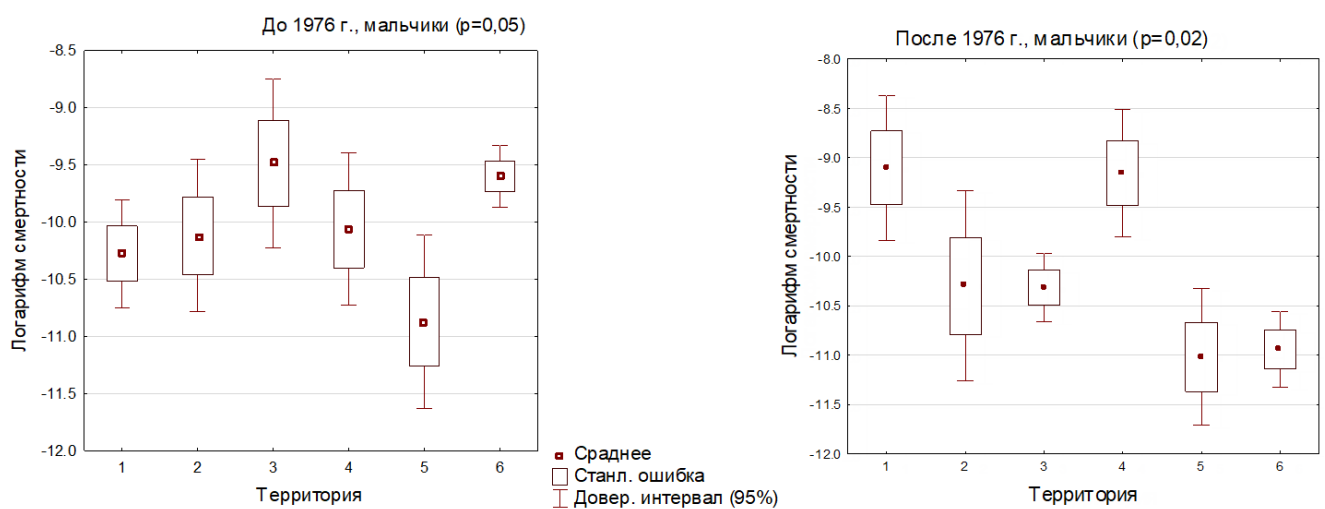


Рис. 5. Смертность мальчиков (логарифм) от онкологических заболеваний по территориям Челябинской области

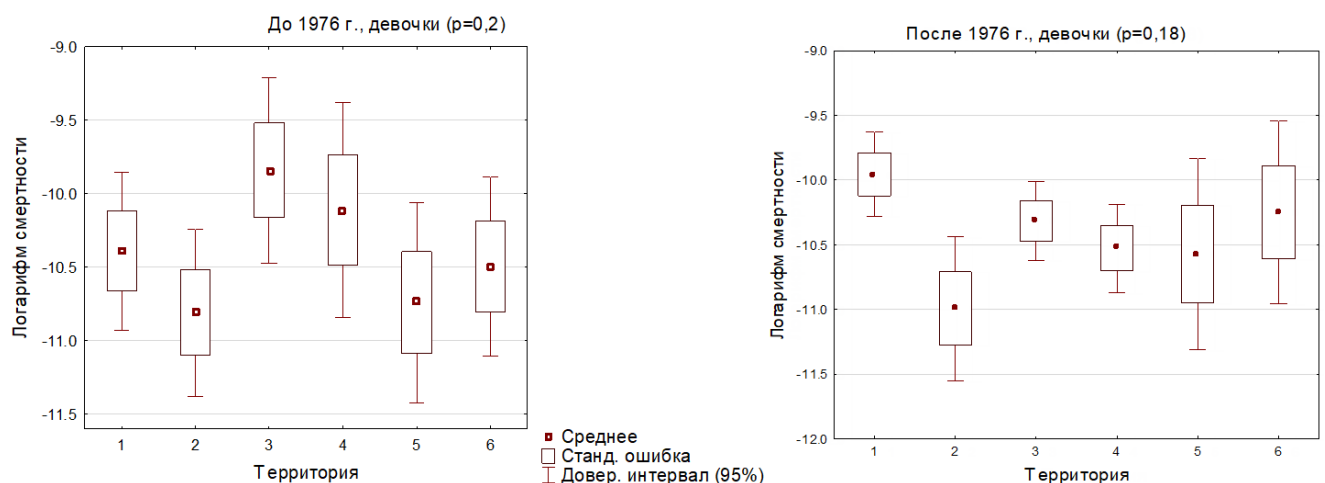


Рис. 6. Смертность девочек (логарифм) от онкологических заболеваний по территориям Челябинской области

Теперь стало видно, что в период после 1976 г. явно проявляется тенденция к уменьшению смертности детей по мере удаления территории их проживания от Аргаяшской ТЭЦ. Исключение составляют только г. Касли, где, по-видимому, все еще

сказывается близость к ПО «Маяк». Из приведенного анализа можно сделать вывод, что в течение периода наблюдения произошло существенное перераспределение детской смертности от онкологических заболеваний по территориям Челябинской области.

Интересно сравнить полученные результаты с выводами из нашей предыдущей работы [8], посвященной анализу смертности населения от рака щитовидной железы на тех же территориях и ее связи с выбросами радиойода с промышленной площадки ПО «Маяк». И в этом случае в период после 1976 г., когда эти выбросы прекратились, произошло значительное и повсеместное уменьшение такой смертности. Это говорит о том, что фактор риска, связанный с выбросами радиойода, был определяющим для возникновения и развития рака щитовидной железы.

Что же касается онкологических заболеваний других локализаций, то здесь, по всей видимости, действуют несколько основных факторов риска, разнесенных в пространстве и во времени. С изменением их интенсивности происходит соответствующее перераспределение уровней смертности по территориям. Такими факторами могут быть: 1 - выбросы радиоактивных веществ с территории ПО «Маяк», и 2 - выбросы химических канцерогенов от Аргаяшской ТЭЦ.

Мероприятия по модернизации технологических процессов и совершенствованию систем безопасности, проведенные на ПО «Маяк» и обеспечившие значительное сокращение выбросов радиоактивных веществ, оказали существенное положительное влияние на ситуацию с онкологическими заболеваниями у населения. Значительно снизилась смертность людей от рака щитовидной железы [8], и произошло существенное перераспределение величины смертности детей от онкологических заболеваний по территориям, а также снижение смертности в районах, примыкающих к ПО «Маяк», и одновременно повышение на территориях, прилегающих к Аргаяшской ТЭЦ. Это указывает на целесообразность проведения на Аргаяшской ТЭЦ мероприятий по снижению выбросов химических канцерогенных веществ, выделяющихся при сжигании топлива, для уменьшения риска развития онкологических заболеваний у населения прилегающих территорий.

5. Выводы

1. На исследованных территориях Челябинской области за время наблюдения произошло значительное перераспределение величины детской смертности от онкологических заболеваний по территориям. Если в период до 1976 г. максимальная смертность наблюдалась в районах, прилегающих к ПО «Маяк», то в период после 1976 г. – на территориях вблизи Аргаяшской ТЭЦ.
2. Выявлена бóльшая чувствительность к воздействию факторов риска развития онкологических заболеваний у мальчиков по сравнению с девочками.
3. Наряду с хроническим радиационным воздействием показана существенная роль химической канцерогенной нагрузки в росте детской онкологической смертности.

6. Список литературы

1. Каткова, М. Н. Оценка химического риска для населения, проживающего в зоне влияния радиационного объекта (на примере п. Новогорного Челябинской области) / М. Н. Каткова, М. В. Иваницкая // Радиация и риск. – 2008. – 17 (4): 67–77.
2. Крестинина, Л. Ю. Онкологическая смертность при хроническом воздействии «малых» и «средних» доз облучения в когорте лиц, облученных на ВУРС / Л. Ю. Крестинина, А. В. Аклеев // Бюллетень Сибирской медицины. – 2005. – 2: 36–45.
3. ВОЗ. Медицинские последствия Чернобыльской аварии: обзор. Информационный бюллетень. 2006, 303. – URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs303/ru/> (Дата обращения:)
4. Скачков, М. В. Ретроспективный анализ смертности населения в регионе Тоцкого ядерного взрыва / М. В. Скачков, А. Ш. Альмишева, Е. Н. Тюрин // Гигиена и санитария. – 2003. – 1: 40-2.

5. *Коньшина, Л. Г.* Смертность от гемобластозов и злокачественных новообразований костной ткани у населения, проживающего на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа в Свердловской области / Л. Г. Коньшина, И. В. Ярмошенко // Вестник Уральской медицинской академической науки. – 2007. – 4: 8–12.
6. *Двойрин, В. В.* Злокачественные новообразования детей в регионах, подверженных радиационному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС / В. В. Двойрин, Е. М. Аксель // Радиация и риск. – 1995. – 6: 156–183.
7. *Коньшина, Л. Г.* Онкологическая смертность детского населения на территориях Челябинской области, пострадавших от радиационных аварий / Л. Г. Коньшина, Л. Л. Липанова // Гигиена и санитария. 2022. – 101(6): 662-9. – URL: <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-6-662-669> (Дата обращения:).
8. *Коньшина, Л. Г.* Смертность от злокачественных новообразований щитовидной железы на территориях в Челябинской, Свердловской и Курганской областях, пострадавших от радиационных аварий / Л. Г. Коньшина, А. А. Живодеров // Траектория исследований: человек, природа, технологии [сетевой журнал] 2022. – 4: 88–101.
9. *Fletcher, R. H.* Clinical epidemiology: The essentials / R. H. Fletcher, S. W. Fletcher– Lippincott Williams & Wilkins, 2012. – 272 p. – ISBN 978-1451144475.
10. *Майерс, Дж. Л.* Дизайн исследования и статистический анализ / Дж. Л. Майерс, А. Д. Уэлл. – 2-е изд. – Эрлбаум. 2003. – 508 с. – ISBN 978-0-8058-4037-7
11. Радиозэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии / С. В. Панченко, М. В. Ведерникова, И. И. Линге [и др.]; под ред. И. И. Линге, И. И. Крышева. – М. : Росатом, 2021. – 555 с.

Сведения об авторах:

Живодеров Андрей Алексеевич, к. физ.-мат. н., старший научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: csl@cbibl.uran.ru

Коньшина Лидия Геннадьевна, к. м. н., старший научный сотрудник Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

THE STUDY OF THE MORTALITY OF CHILDREN FROM CANCER IN THE TERRITORIES OF THE CHELYABINSK REGION EXPOSED TO RADIOACTIVE AND CHEMICAL CONTAMINATION BY METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS

A. A. Zhivoderov, L. G. Kon'shina

Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia

In the territories of the Chelyabinsk Region that are radioactively contaminated, as a result of the activities of the Mayak project, the level of pediatric cancer mortality has significantly increased. To study the statistical indicators of infant mortality from cancer in the territories under consideration and to identify the impact of radioactive and chemical pollutants on it. Methods of mathematical statistics were used for data processing, such as analysis of variance, construction of confidence intervals for odds ratios, calculation of rank correlation coefficients. According to the results of the study, it can be stated that in the period up to 1976, there is a significant ($p < 0.1$) influence of the proximity factor of the territory to the Mayak software on the mortality rate of children from cancer. In the period after 1976, such an influence is not reliably detected. In the period after 1976 a significant ($p < 0.1$) correlation is already revealed between the degree of proximity of the territory to the Argayash thermal power plant and the level of oncological mortality of children. In the period before 1976, such a correlation did not appear. In the studied territories of the Chelyabinsk region, during the observation period, there was a significant redistribution of the value of infant mortality from cancer. If in the period before 1976, the maximum mortality was observed in the areas adjacent to the Mayak software, then in the period after 1976 – in the territories near the Argayash thermal power plant. Revealed greater sensitivity to the effects of risk factors for cancer in boys compared with girls. Along with chronic radiation exposure, the significant role of chemical carcinogenic load in the growth of pediatric cancer mortality is shown.

Key words: statistical analysis, children, mortality, malignant neoplasms

References

1. *Katkova, M. N.* Assessment of chemical risk for the population living in the zone of influence of a radiation object (on the example of Novogorny settlement of the Chelyabinsk region) / M. N. Katkova, M. V. Ivanickaja // Radiacija i risk. – 2008, 17(4): 67–77. [in Russian]
2. *Krestinina, L. Ju.* Oncological mortality due to chronic exposure to "small" and "medium" doses of radiation in a cohort of people exposed to East Ural radioactive trace (EURT). / L. Ju. Krestinina, A. V. Akleev // Bjulleten' Sibirskoj mediciny. – 2005, 2: 36–45. [in Russian]
3. WHO. Medical consequences of the Chernobyl accident: an overview. Informacionnyj bjulleten' 2006, 303. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs303/ru/>
4. *Skachkov, M. V.* Retrospective analysis of population mortality in the Totsky nuclear explosion region. / M. V. Skachkov, A. Sh. Al'misheva, E. N. Tjurin // Gigiena i sanitariya. – 2003, 1: 40–42. [in Russian]
5. *Kon'shina, L. G.* Mortality from hemoblastosis and malignant neoplasms of bone tissue in the population living on the territory of the East Ural radioactive trace in the Sverdlovsk region. / L. G. Kon'shina, I. V. Jarmoshenko // Vestnik Ural'skoj medicinskoj akademicheskoy nauki. – 2007, 4: 8-12. [in Russian]
6. *Dvojrjn, V. V.* Malignant neoplasms of children in regions exposed to radiation pollution as a result of the Chernobyl accident. / V. V. Dvojrjn, E. M. Aksel' // Radiacija i risk. – 1995, 6: 156–183. [in Russian]
7. *Kon'shina, L. G.* Oncological mortality of the child population in the territories of the Chelyabinsk region affected by radiation accidents. / L. G. Kon'shina, L. L. Lipanova // Gigiena i sanitariya. – 2022, 101(6): 662-9 <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-6-662-669> [in Russian]
8. *Kon'shina, L. G.* Mortality from malignant neoplasms of the thyroid gland in the territories in the Chelyabinsk, Sverdlovsk and Kurgan regions affected by radiation. / L. G. Kon'shina,

- A. A. Zhivoderov // Traektorija issledovaniy: chelovek, priroda, tehnologii. [setevoj zhurnal]. – 2022, 4: 88-101. [in Russian]
9. *Fletcher, R. H.* Clinical epidemiology: The essentials / R. H. Fletcher, S. W. Fletcher– Lippincott Williams & Wilkins, 2012. – 272 p. – ISBN 978-1451144475,
 10. *Myers, J. L.* Research Design and Statistical Analysis. / J. L. Myers, A. D. Well // Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. 2003. 508 p. (In Russian)
 11. Radioecological situation in the regions of the location of enterprises State Atomic Energy Corporation. / S V. Panchenko, M. V. Vedernikova, I. I. Linge [et al.]; I. I. Linge, I. I. Krysheva. ed. — Moskow: Rosatom, 2021. – 555 p. (In Russian)