

УДК 631.41:631.438

Оценка активности ^{40}K в профиле почв Ростовской агломерации

Activity assessment of ^{40}K in the soil profile of Rostov agglomeration

Козырев Д. А., Тагивердиев С. С., Горбов С. Н., Бураева Е. А., Безуглова О. С.

Kozyrev D.A., Tagiverdiev S.S., Gorbov S.N., Buraeva E.A., Bezuglova O.S.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

DOI: 10.18522/2308-9709-2023-44-4

Аннотация

Изучена активность радионуклида ^{40}K в черноземах и урбостратоземах Ростовской агломерации. Определение активности проводили на приборе Прогресс-Гамма, а также расчётным методом исходя из валового содержания калия в почвах. Отмечен процесс биогенного накопления ^{40}K в поверхностных горизонтах. В почвообразующей породе не выявлено достоверных различий между фактической и расчетной активностью ^{40}K , в то время как в горизонтах А и В расчетная активность достоверно выше, что говорит о более активном вовлечении ^{40}K в биогенные круговороты нежели его стабильных изотопов.

Процесс погребения сопровождается слабым изменением активности ^{40}K в профиле, нивелируется разница между генетическими горизонтами, при этом достоверных различий между нативными и их погребенными аналогами нет.

Гранулометрический состав не имеет прямого влияния на содержание ^{40}K , вероятно, в первую очередь этот показатель обоснован минералогическим составом. Можно сделать предположение, что ^{40}K хуже проникает в межпакетное пространство слоистых минералов по сравнению с ^{39}K .

По величине активности ^{40}K тяжелые горизонты урбик генетически в большей степени связаны с нативными и погребенными горизонтами, особенно с иллювиальными горизонтами В. Средняя активность ^{40}K для URл самая низкая среди всех исследованных естественных и антропогенных горизонтов, при этом достоверные различия характерны для всех фактических значений активности при сравнении URл с нативными, погребенными горизонтами и группой горизонтов URт.

Abstract

Activity concentration of radionuclide ^{40}K in chernozems and urbostratozems of Rostov agglomeration was studied. Activity was determined on the Progress-Gamma instrument as well as by the calculation method based on the gross potassium content in soils. The process of

biogenic accumulation of ^{40}K in the surface horizons was noted. In the soil-forming rock no reliable differences between the actual and calculated activity of ^{40}K were revealed, while in the A and B horizons the calculated activity is reliably higher, which indicates a more active involvement of ^{40}K in the biogenic cycles than its stable isotopes.

The process of burial is accompanied by a weak change in the activity of ^{40}K in the profile, the difference between the genetic horizons is leveled, with no significant differences between the native and their buried counterparts.

The granulometric composition has no direct influence on the ^{40}K content; probably, this indicator is primarily justified by the mineralogical composition. It can be assumed that ^{40}K penetrates the interstitial space of layered minerals worse than ^{39}K .

In terms of the ^{40}K activity value, the heavy horizons of the Urbik are genetically more related to the native and buried horizons, especially to the illuvial horizons B. The average ^{40}K activity for UR1 is the lowest among all the studied natural and anthropogenic horizons, with reliable differences characteristic of all actual activity values when comparing UR1 with native, buried horizons and the URt horizon group.

Ключевые слова: чернозем, урбостратозем, радионуклиды, ^{40}K , Ростовская агломерация

Keywords: chernozem, urbostratozem, radionuclides, ^{40}K , Rostov agglomeration

Введение. Калий в геохимической классификации типичный щелочной металл, широко распространенный в природе. Его кларк в земной коре по разным данным составляет от 2,35 до 2,59 % (Clarke, Washington, 1924; Виноградов, 1962; Мейсон, 1971; Ярошевский, 1988). В магматических породах калий распределен неравномерно, в среднем от $3,9 \times 10^{-4}$ до $0,6 \times 10^{-4}$ %, уменьшаясь в ряду от кислых до ультраосновных пород. В осадочных породах его содержание (%) также варьирует в широких пределах: сланцы глинистые — $2,7 \times 10^{-4}$, песчаники — $1,4 \times 10^{-4}$, известняки — $0,4 \times 10^{-4}$ (Пчелкин, 1966; Прокошев, 1984; Якименко, 2003).

Под влиянием выветривания элемент из калийсодержащих пород переходит в растворимые соединения, которые частично удерживаются почвой в обменном состоянии, а частично уносятся в моря и океаны, где калий аккумулируется в донных отложениях. Поглощенный глинами, главным образом гидрослюдами, калий со временем переходит в необменное состояние. Из этих минералов он частично вытесняется ионом гидроксония (H_3O^+) (Перельман, 1972), причем в зависимости от степени вытеснения образуются гидробиотиты, иллиты и другие гидрослюды. По мере выветривания слюд увеличивается и их дисперсность, площадь поверхности и емкость катионного обмена. Согласно данным Прокошева, Дерюгина (2000) содержание калия при этом снижается с 10% в слюдах до 1% в монтмориллоните и вермикулите.

Природный калий включает в себя три изотопа, стабильные ^{39}K (93,258 %) и ^{41}K (6,73 %), а также β -активный ^{40}K (0,0117 %) с периодом полураспада $1,3 \times 10^9$ лет. При β -распаде (вероятность 89 %) переходит в ^{40}Ar , при K -захвате (вероятность 11 %) образуется ^{40}Ca (Audi et al., 2017). В современной геохронологии данный β -распад лежит в основе метода калий-аргонового датирования, позволяющего определить абсолютный возраст объектов (Dickin, 2005). Калий-40 один из главных естественных радионуклидов на Земле (Wu et al., 2018). Так распад ^{40}K является основным источником геотермальной энергии и по некоторым оценкам составляет 40–44 ТВт, что вносит существенный вклад в тепловой баланс Земли (Капитинов, 2017).

Если говорить о почвах, естественная радиоактивность наследуется ими прежде всего от почвообразующей породы. Наиболее высокие показатели активности соответствуют почвам, развившимся на кислых магматических породах, а наиболее высокая концентрация естественных радионуклидов наблюдается в мелкодисперсной фракции почв — глинистых минералов (Рихванов и др., 2009).

Валовое содержание калия в разных типах почв изменяется в пределах от 1 до 3,5 %, при этом активность, ^{40}K составляет 300–1000 Бк/кг (приблизительно 80–95 % от всей радиоактивности почвы) (Sources and effects of ionizing radiation, 2000; Ляндзберг, 2006).

В результате почвообразования ^{40}K перераспределяется в почвенном профиле, что видно из его различной активности в генетических горизонтах, а законы миграции не всегда одинаковы с изотопом ^{39}K . В живых организмах ^{40}K с необходимостью присутствует наряду с двумя другими стабильными природными изотопами калия. Множество работ, описывающих влияние радиации на живые организмы, указывают на угнетение роста и развития, а также подавление репродуктивных функций растений и животных в отсутствии естественных источников радиации, значительную часть которой в естественных условиях составляет изотоп ^{40}K (Алексахин, Корнеев, 1992; Бурлакова и др., 2003; Романцева, 2012; Хлебный и др., 2019).

Таким образом, изучение ^{40}K как главного естественного агента радиации на Земле необходимо. Важным является исследование законов миграции данного изотопа в почвенном профиле, т. к. именно почва является переходной средой для биологического круговорота калия.

Объекты и методы. Ростовская агломерация находится на Юге России в одноименной области и включает в себя несколько городов: Ростов-на-Дону, Новочеркасск, Таганрог, Аксай, Батайск и Азов. Города объединены в один урбанистический центр с населением свыше двух миллионов человек, являясь крупным административным, культурным, научно-образовательным, промышленным центром и важнейшим транспортным узлом Юга России.

На территории агломерации умеренно континентальный климат. Мягкая и малоснежная зима. Снежный покров сохраняется на протяжении 10–20 дней. Средняя температура января $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, ежегодный среднестатистический минимум в зимний период составляет $-21,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Лето жаркое, продолжительное и засушливое, на протяжении всего сезона преобладает солнечная погода; средняя температура июля $+28,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Панов и др., 2006). Почвообразующими породами чаще всего выступают четвертичные отложения, представленные лессовидными глинами и суглинками (Миноранский, 2004; Безуглова, Хырхырова, 2008).

В почвенном покрове Ростовской агломерации ведущую роль играют *Naptic Chernozems* (WRB, 2022), черноземы миграционно-сегрегационные согласно Российской

Научное электронное периодическое издание ЮФУ «Живые и биокосные системы», № 44, 2023 г. классификации (Шишов и др. 2004), различной мощности и гумусированности. Черноземы, сохранившиеся нетронутыми в Ростовской агломерации, имеют профиль А–В–С (FAO, 2006) по классификации России АU–ВСА–С (Шишов и др., 2004). Где А (AU) – гумусово-аккумулятивный горизонт; В (ВСА) – иллювиально-карбонатный; С – почвообразующая порода. Нативные почвы в настоящее время все чаще подвергаются воздействию на них человека. В большинстве случаев это воздействие служит основой для появления природно-антропогенных комплексов, которые требуют рассматривать их как единую систему. Для нее характерно взаимодействие всех компонентов окружающей среды, как природных, так и антропогенных. Основополагающим в составе ландшафта является почва, а преобладающим фактором почвообразования становится антропогенный фактор (Горбов и др., 2015). В результате данного взаимодействия формируются Technic Chernozems по (WRB, 2022) или урбистратифицированные черноземы согласно Российской классификации (2004) – это почвы естественного сложения, сверх которых происходит нарастание горизонта UR (урбик) мощностью менее 40 см (Прокофьева и др., 2014), или горизонтов Au, Vu, Cu (по FAO 2006). Горизонт UR представлен рыхлыми наслоениями со значительным включением антропогенного материала и может быть перекрыт либо асфальтовыми, либо другими водонепроницаемыми покрытиями. Почвы с мощностью горизонтов урбик более 40 см представлены Urbic Technosol (WRB 2022), урбостратоземами согласно Российской классификации (Прокофьева и др., 2014). Под горизонтами UR находится погребенный нативный профиль Ab–Bb–Cb (FAO 2006) или по классификации России [AU] – [ВСА] – [С] (Прокофьева и др., 2014).

Поскольку горизонты UR являются прямым продуктом урбопедогенеза их свойства могут изменяться в широких диапазонах (Горбов, 2018). Для того чтобы описать горизонты UR, мы их условно разделили на две группы горизонтов: URт – тяжелые, с содержанием частиц <0,01 мм более 40 % и URл – легкие горизонты с содержанием частиц <0,01 мм менее 40 %. Такой подход основан на генезисе: в горизонтах нативных почв содержание частиц размером <0,01 мм составляет более 40 %, а следовательно, и горизонты URт образованы из материала естественных почв. Горизонты URл содержат много песчаных частиц, а потому сильно отличаются от нативных почв (Безуглова и др., 2018).

Нативные почвы в пределах агломерации практически не подвержены антропогенному воздействию. Однако естественные факторы почвообразования в условиях города претерпевают существенные изменения, что отражается и на самих почвах, даже если сохраняется целостность их почвенного профиля. В то же время нельзя

Научное электронное периодическое издание ЮФУ «Живые и биокосные системы», № 44, 2023 г. принимать содержание любых веществ в естественных почвах города за фоновое, поскольку они испытывают такой же прессинг атмосферных выпадений, как и собственно антропогенно-преобразованные почвы.

Для изучения активности ^{40}K пробы были отобраны из всех генетических горизонтов на глубину до 120 см. Поверхностные пробы отбирали методом конверта, который предусматривал выбор выровненного квадратного участка на площадке мониторинга и отбор проб по углам участка и в его центре (ГОСТ Р 53091-2008). Все пробы почвы измельчались до размера частиц не более 1 мм, высушивались при температуре 100 °С и запечатывались в сосуды Маринелли емкостью 1 л и 0,5 л или чашки Петри.

Удельную активность радионуклидов в почвах определяли гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа. Использовали низкофоновую спектрометрическую установку (Bugaeva et al., 2007) на основе полупроводникового коаксиального детектора из особо чистого германия (GeHP) с эффективностью 25 % в диапазоне 13–1500 кэВ, отношением пик/комpton 51,7:1 (модель 7229N-7500s1-2520, Canberra Corporate Headquarters, Франция). Уровень активности ^{40}K определяли по фотопику 1460,8 кэВ (10,4 %). Эту активность ^{40}K мы условно называли фактической.

В различных литературных источниках имеются данные о том, что 1 грамм природного калия обладает активностью в диапазоне от 27 до 30 Бк (Audi et al., 2017; Чернуха, Лазаревич, 2010). Таким образом, имеется возможность на основании валового содержания калия рассчитать потенциальную активность, которой должна обладать почва. Такой расчетный метод позволяет с определенной долей вероятности судить о том, как происходит перераспределение ^{40}K в почвенных профилях. Сравнение расчетных и фактических показателей учитывает ошибку, которая возникает при интерпретации данных, когда калий вносится в почвы в качестве удобрений или другим антропогенным путем. Для расчета использовали среднее значение 28,5 Бк на грамм валового калия. Такую активность ^{40}K мы условно назвали расчетной.

Статистическая обработка включала анализ 29 полнопрофильных разрезов (181 горизонт), были применены методы описательной статистики, расчет критерия Мана-Уитни (Дмитриев, 2010).

Результаты. Оценку представленных выборок проводили с использованием описательной статистики фактических (полученных при измерении) и расчетных

Научное электронное периодическое издание ЮФУ «Живые и биокосные системы», № 44, 2023 г. (полученных из величины валового калия) значений, зафиксированных для естественных и погребенных горизонтов, а также для горизонтов UR (таблица 1, 2).

Таблица 1 – Описательная статистика активности ^{40}K в естественных, погребенных профилях черноземов и горизонтах урбик

| Показатель | A, B, C | Ab, Bb, Cb | UR | A, B, C | Ab, Bb, Cb | UR |
|------------------------|-------------|------------|---------|-----------|------------|---------|
| | Фактическое | | | Расчетное | | |
| Среднее | 458,9 | 457,2 | 398,6 | 509,3 | 487,6 | 447,7 |
| Стандартная ошибка | 8,5 | 14,2 | 23,1 | 4,5 | 8,4 | 14,0 |
| Медиана | 446,0 | 435,4 | 404,5 | 516,5 | 475,9 | 453,3 |
| Мода | 471,0 | 777,0 | 424,0 | - | - | - |
| Стандартное отклонение | 82,5 | 100,5 | 138,7 | 44,2 | 59,2 | 83,8 |
| Дисперсия выборки | 6799,5 | 10102,9 | 19243,7 | 1956,1 | 3508,5 | 7019,6 |
| Экссесс | 0,4 | 2,8 | 0,0 | -0,6 | 0,7 | 3,0 |
| Асимметричность | 0,6 | 1,6 | 0,0 | -0,1 | 0,9 | -1,3 |
| Интервал | 419,0 | 441,7 | 597,0 | 187,6 | 260,4 | 422,7 |
| Минимум | 252,0 | 335,3 | 110,0 | 417,6 | 386,0 | 202,3 |
| Максимум | 671,0 | 777,0 | 707,0 | 605,2 | 646,4 | 625,0 |
| Сумма | 43599,4 | 22860,0 | 14349,3 | 48384,0 | 24380,9 | 16115,6 |
| Счет | 95,0 | 50,0 | 36,0 | 95,0 | 50,0 | 36,0 |

Несмотря на то, что средние и минимальные значения, а также сумма активностей ^{40}K и их медианы выше в расчетных выборках, величины максимальных значений не показали подобного результата и они выше в группе фактически выявленных значений, равно как и стандартная ошибка, дисперсия и стандартное отклонение. Показатель асимметрии указывает на то, что выборки в расчетной группе смещаются влево относительно фактических. Только выборка UR из группы фактических значений имеет нормальное распределение. При этом выборки горизонтов UR имеют наибольшую вариацию, каждая в своей группе. Нужно отметить, что предыдущие исследования горизонтов UR показали высокую вариацию физических и химических свойств (Горбов и др., 2016; Безуглова и др., 2018; Tagiverdiev et al., 2020). Если сравнивать выборки погребенных и естественных профилей, видно, что вариационные отличия доминируют в погребенных выборках. При этом в группе фактических значений разница между средними и между медианами существенно меньше, чем в группе расчетных значений.

Таблица 2 – Средние величины фактических и расчетных значений активности ^{40}K для выборок естественных и антропогенно-преобразованных горизонтов почв

| Горизонт | Фактические | Расчетные |
|----------|-------------|-----------|
| A | 487 | 520 |
| B | 447 | 474 |

| | | |
|-----------------|-----|-----|
| C | 437 | 439 |
| Ab | 478 | 511 |
| Bb | 446 | 464 |
| Cb | 465 | 434 |
| UR _T | 456 | 486 |
| UR _Л | 309 | 387 |

Из представленных выше таблиц следует, что расчетные значения активности ^{40}K в подавляющем большинстве случаев превышают фактические, при этом для выборки расчетных значений характерна меньшая рассеянность, что находит отражения в таких показателях как стандартное отклонение. Кроме того, применение описательной статистики приведенных выборок позволяет отметить различия активности ^{40}K для профилей как естественных, так и антропогенно-преобразованных почв.

Обсуждение. С целью оценки перераспределения активности ^{40}K в почвенном профиле естественных и антропогенно-преобразованных почв сравнили выборки различных горизонтов на наличие достоверных различий между ними. На рисунке 1 представлены полученные данные, при этом фактические и расчетные значения сравнивались отдельно.

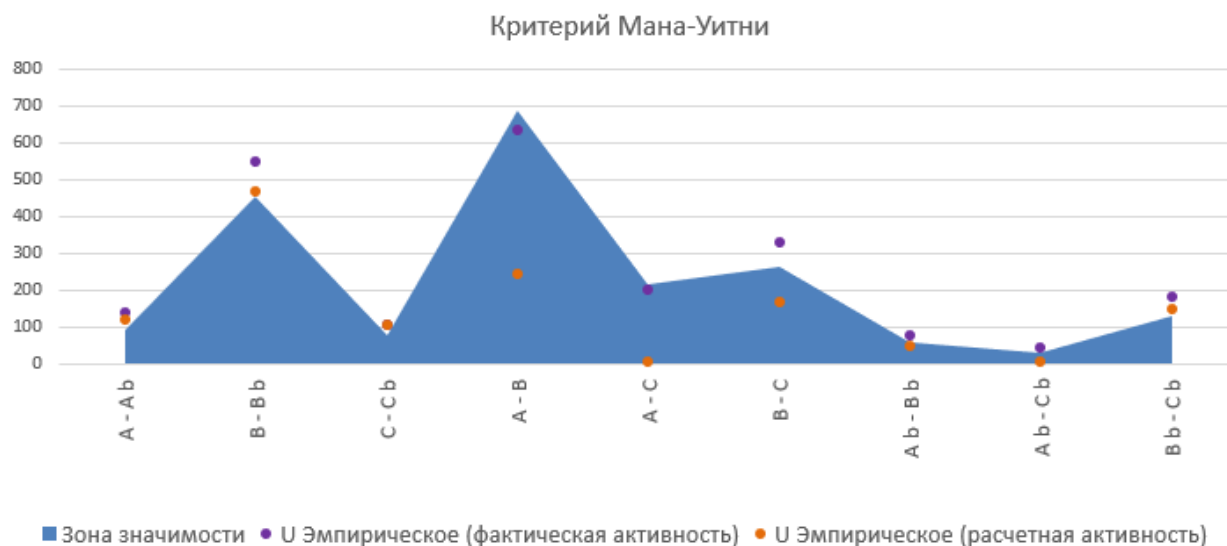


Рисунок 1 – Критерий Мана-Уитни для фактических и расчетных выборок активностей ^{40}K в сравнениях разных генетических горизонтов

Показательно, что между погребенными и нативными горизонтами в ряду A–Ab; B–Bb; C–Cb, как в расчетных, так и фактических сравнениях нет достоверных различий. Это указывает на тот факт, что процесс погребения не оказывает значимого влияния на

Козырев Д. А., Тагивердиев С. С., Горбов С. Н., Бураева Е. А., Безуглова О. С., Оценка активности ^{40}K в профиле почв Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2023. – № 44; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-44/article-4>; DOI: 10.18522/2308-9709-2023-44-4

активность ^{40}K , если рассматривать их на уровне генетических горизонтов. Однако, как отмечалось выше (таблица 2) в фактических выборках, средние значения между погребенными горизонтами распределены более плавно чем в нативных профилях. Это также подтверждается отсутствием достоверных различий фактических активностей в сравнениях горизонтов (Ab–Bb; Ab–Cb; Bb–Cb) (рисунок 1). Такое плавное распределение показателя в погребенном профиле связано с выщелачиванием, характерным для погребенных горизонтов. Дело в том, что погребенный под антропогенной толщей профиль черноземов чаще всего не имеет единой капиллярной системы при переходе от гумусово-аккумулятивных погребенных горизонтов к горизонтам UR (Gorbov et al., 2022), в результате чего резко снижается возможность формирования естественного восходящего тока влаги в почвенном профиле в летние периоды. Такие условия увлажнения и прекращения ризосферой деятельности, которая сохраняла калий в верхних горизонтах, проявляются перераспределением обменного калия в почвенном профиле. Установлено, что подобный процесс выщелачивания характерен даже для такой слаборастворимой соли как карбонат кальция (Tagiverdiev et al., 2020).

Нужно отметить, что гумусово-аккумулятивные горизонты А отличаются наивысшей фактической активностью ^{40}K . При этом во всех нативных горизонтах естественных почв отмечена достоверная разница фактической активности при сравнении пар горизонтов А–В и А–С и ее отсутствие в паре В–С. На этом фоне расчетная активность ^{40}K показала достоверные различия во всех трех указанных парах сравнения. Учитывая данные, полученные при сравнении фактических и расчетных значений активности (рисунок 2), показывающие достоверно более высокие расчетные значения в горизонтах А и В (таблица 2), можно говорить о более высокой биогенности ^{40}K по сравнению со стабильными изотопами.

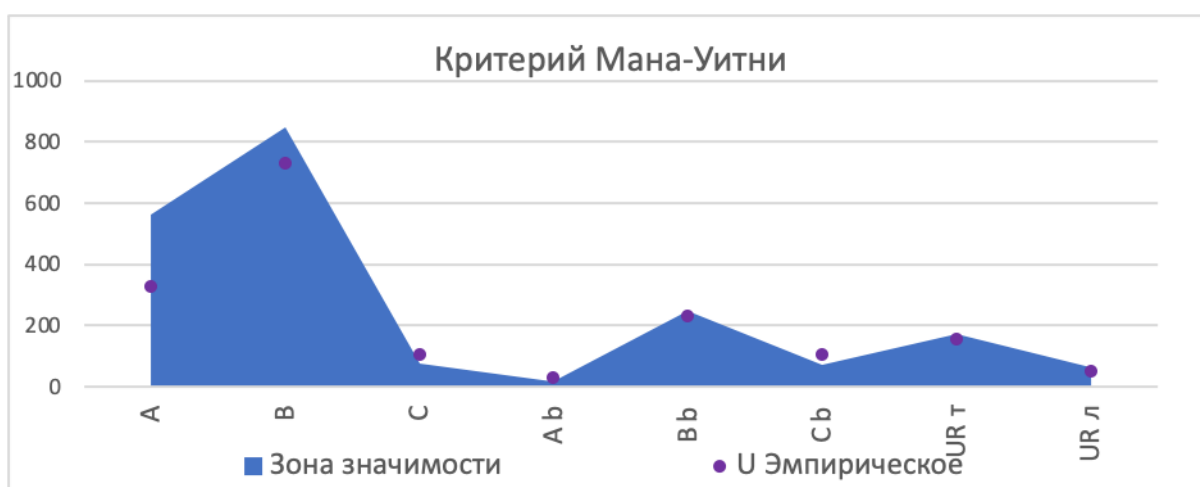


Рисунок 2 – Критерий Мана-Уитни в сравнениях между фактическими и расчетными выборками активностей ^{40}K в разных генетических горизонтах

Некоторые авторы отмечают, что активность ^{40}K , связана с гранулометрическим составом, фиксируя его различную поведение при сравнении легких и тяжелых почв (Дубенок, 2010; Ames, Rai, 1978). Другие, напротив, не связывают эти показатели напрямую (Соколовская, 2019). Вероятно, ведущую роль играет минералогический состав почв, который обуславливает активность и доступность ^{40}K . Так согласно данным Чухрова (1955), Пчелкина (1966) в межпакетном пространстве мусковита и гидрослюды содержатся трудно обмениваемые ионы калия. Rich (1964) указывает что селективная адсорбция калия связана с клинообразными зонами кристаллической решетки, куда не могут попасть ионы кальция и магния из-за своего размера. Возможно, что ^{40}K в силу строения своего ядра хуже проникает в данное межпакетное пространство, сорбируясь прежде всего на поверхности минералов. Таким образом отношение ^{39}K к ^{40}K в доле обменных форм почвенного калия уменьшается по сравнению с валовыми формами. Это в свою очередь приводит к тому, что ^{40}K более активно вовлекается в биогенные циклы.

Как и ожидалось тяжелые горизонты урбик URt имеют высокое сродство с горизонтами B и Bb, что подтверждается как средними значениями (таблица 2), так и критерием Мана-Уитни (рисунок 3). Нужно отметить, что в работе, посвященной физическим свойствам почв (Безуглова и др., 2018), также прослеживается подобная закономерность. Из чего следует, что основным материалом для горизонтов URt является горизонт B, а разделение горизонтов урбик на основании гранулометрического состава нативных почв является обоснованным.

Рисунок 3 – Критерий Мана-Уитни для фактических и расчетных выборок активностей ^{40}K в сравнениях разных генетических горизонтов

Горизонты URл в целом ведут себя предсказуемо. Активность ^{40}K здесь ниже, чем в других горизонтах. Связано это с высоким содержанием песчаных частиц, основная масса которых представлена кварцем. Кварц согласно многим исследованиям, обладает минимальной адсорбцией, а активность ^{40}K обусловлена прежде всего калием кристаллической решетки кварца. Интересным, однако является тот факт, что расчетная активность в сравнениях с горизонтами С и Сб не проявляет достоверных различий (рисунок 3).

Выводы. В результате эволюции почв наблюдается процесс биогенного накопления ^{40}K в поверхностных горизонтах. В почвообразующей породе не выявлено достоверных различий между фактической и расчетной активностью ^{40}K , в то время как в горизонтах А и В расчетная активность достоверно выше, что говорит о более активном вовлечении ^{40}K в биогенные круговороты нежели его стабильные изотопы.

Процесс погребения сопровождается слабым изменением активности ^{40}K в профиле, нивелируется разница между генетическими горизонтами, при этом достоверных различий между нативными и их погребенными аналогами нет.

Гранулометрический состав не имеет прямого влияния на содержание ^{40}K , вероятно, в первую очередь этот показатель обоснован минералогическим составом. Можно сделать предположение, что ^{40}K хуже проникает в межпакетное пространство слоистых минералов по отношению к ^{39}K .

По величине активности ^{40}K тяжелые горизонты урбик генетически в большей степени связаны с нативными и погребенными горизонтами, особенно с иллювиальными горизонтами В. Средняя активность ^{40}K для URл самая низкая среди всех исследованных естественных и антропогенных горизонтов, при этом достоверные различия характерны для всех фактических значений активности при сравнении URл с нативными, погребенными горизонтами и группой горизонтов URт.

Литература

1. Алексахин Р.М., Корнеев Н.А. Сельскохозяйственная радиозэкология. М.: 1992. – 400 с.

2. Безуглова О. С., Тагивердиев С. С., Горбов С. Н. Физические характеристики городских почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1153–1159. doi: 10.1134/S0032180X18090022
3. Безуглова О. С., Хырхырова М. М. Почвы Ростовской области: учебное пособие. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. – 352 с.
4. Бурлакова Е. Б., Конрадов А. А., Мальцева Е. Л. Действие сверхмалых доз биологически активных веществ и низкоинтенсивных физических факторов // Химическая физика, 2003. Т. 22. № 2. – С. 21–40.
5. Виноградов А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия, 1962. Вып. 7. – С. 555–571.
6. Горбов С. Н., Безуглова О. С., Вардуни Т. В., Горовцов А. В., Тагивердиев С. С., Гильдебрант Ю. А. Генотоксичность и загрязнение тяжелыми металлами естественных и антропогенно-преобразованных почв Ростова-на-Дону // Почвоведение, 2015. № 12. – С. 1519–1529.
7. Горбов С.Н., Безуглова О. С., Абросимов К.Н., Скворцова Е. Б., Тагивердиев С.С., Морозов И. В. Физические свойства почв Ростовской агломерации // Почвоведение, 2016, № 8, с. 964–974.
8. Горбов, С. Н. Генезис, классификация и экологическая роль городских почв Европейской части Юга России (на примере Ростовской агломерации): Дисс. ... докт. биол. наук / С. Н. Горбов. – М., 2018. – 488 с.
9. ГОСТ Р 53091-2008. Качество почвы. Отбор проб. Ч. 3: Руководство по безопасности. М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с
10. Дмитриев Е. А. Математическая статистика в почвоведении. Москва, 2010. – 336 с.
11. Дубенок Н. Н., Тобратов С. А., Мажайский Ю. А., Кононова Г. А. Природные и техногенные факторы естественной радиоактивности почв центра России // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук, 2010. № 4. – С. 27–31.
12. Капитинов И. М. Ядерное тепло Земли // Радиоактивность атомных ядер: учебное пособие под ред. Б. С. Ишханова. М.: Университетская книга, 2017. – С. 48–56.
13. Ляндзберг Р.А. Составляющие естественного радиационного фона // Вестник КамчатГТУ, 2006. №5 – С. 21–22.
14. Мейсон Б. Основы геохимии. М.: Недра, 1971. – 311с.

15. Миноранский В. А. Уникальные экосистемы: дельта Дона (природные ресурсы и их сохранение). Ростов-на-Дону: Изд-во ООО "ЦВВР". 2004. – 234 с.
16. Панов В. Д., Лурье П. М., Ларионов Ю. А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2006. – 487 с.
17. Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. – 288 с.
18. Прокофьева Т. В., Герасимова М. И., Безуглова О. С., Бахматова К. А., Гольева А. А., Горбов С. Н., Жарикова Е. А., Матинян Н. Н., Наквасина Е. Н., Сивцева Н. Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение, 2014. № 10. С. 1155–1164.
19. Прокошев В. В. Агрохимия калийных удобрений: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1984. – 40 с.
20. Прокошев В. В., Дерюгин И. П. Калий и калийные удобрения. М.: Ледум, 2000. – 184 с.
21. Пчелкин В. У. Почвенный калий и калийные удобрения. М.: Колос, 1966. – 336 с.
22. Рихванов Л. П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозологии. Томск: STT, 2009. – 430 с.
23. Романцова Н. А. Естественные и техногенные радионуклиды в почвах Плавского радиоактивного пятна ТЭС о "1-3" в Тульской области // Агротехнический вестник, 2012. №6. – С. 34–37.
24. Соколовская С. Н. Содержание изотопов калия-40 в почвах различных видов // Современные технологии сельскохозяйственного производства : сборник научных статей по материалам XXII Международной научно-практической конференции (Гродно, 7 июня, 29 марта 2019 года) Технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, агрономия, защита растений / В. В. Пешко. - Гродно: ГГАУ, 2019. – С. 321–323.
25. Тагивердиев С. С. Влияние урбопедогенеза на морфологические и физические свойства почв Ростовской агломерации: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13 – Ростов-на-Дону, 2020. – 206 с.
26. Хлебный Е. С., Слепцов И. В., Журавская А. Н. Влияние ионизирующего излучения разной мощности экспозиционных доз природной радиации на физиологические и биохимические характеристики ряда видов растений Якутии // Радиационная биология. Радиозология, 2019. Т. 59, № 1. – С. 68–74.

27. Чернуха Г. А., Лазаревич Н. В. Радиационная безопасность: практикум. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2010. – 116 с.
28. Чухров Ф. В. Коллоиды в земной коре. М., 1955. – 671 с.
29. Шишов Л. Л., Гонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. Ойкумена Смоленск, 2004. – 341 с.
30. Якименко В. Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – 231 с.
31. Ярошевский А.А. О геохимической эволюции биосферы // Природа, 1988. №2. – С. 59–67.
32. Ames L. L., Rai D. Radionuclide interactions with soil and rock media: U. S. Environmental Protection Agency // Report EPA 520/6-78-007A. 1978. V. 1. – 306 p.
33. Audi G., Kondev F.G., Wang M., Huang W.J., Naimi S. The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties // Chinese Physics, 2017. 41(3), 030001. doi:10.1088/1674-1137/41/3/030001
34. Buraeva E. A., Davydov M. G., Zorina L. V., Stasov V. V. Components of the Background of ge(Li) and Ge detectors in passive shielding // Atomic Energy, 2007. Vol. 103 (5). – P. 895–900.
35. Clarke F. W., Washington H. S. The Composition of the Earth's Crust // U.S. Dep. Interior. Geol. Surv., 1924. – T. 770. – С. 518.
36. Dickin A. P. Radiogenic Isotope Geology. 2nd ed. Cambridge University Press, 2005. – P. 29–31, 101–135, 275, 324–382. – 512 p.
37. FAO. Guidelines for soil description. Roma, 2006
38. Gorbov S. N., Abrosimov K. N., Bezuglova O. S., Skvortsova E. B., Tagiverdiev S. S., Tishchenko S. A. X-ray microtomography analysis of urban soils of the Rostov region // Geoderma Regional, 2022. 31, e00592. DOI: 10.1016/j.geodrs.2022.e00592
39. IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources, fourth edition. International Union of Soil Sciences, Vienna, 2022.
40. Rich C.T. Effect of cation size and pH on potassium exchange in Nason soil // Soil Science, 98, 1964, pp 100-112.
41. Sources and effects of ionizing radiation UNSCEAR-2000 // Report to the general assembly with scientific annexes, 2000. Vol. 1. – 291 p.
42. Tagiverdiev S.S. Gorbov S.N. Bezuglova O.S. Skripnikov P.N. The content and distribution of various forms of carbon in urban soils of southern Russia on the example of Rostov agglomeration // Geoderma Regional, 2020. V. 21. e00266.

43. Wu C.-M., Adetona O., Naeher L., Viner B. J., Jannik T., Hepworth A., Doman E., Eddy T. Radionuclide distribution in soil and undecayed vegetative litter samples in a riparian system at the Savannah River Site, SC // *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.017>

References

1. Aleksakhin R.M., Korneev N.A. *Agricultural radioecology*. M.: 1992. – 400 p.
2. Bezuglova O.S., Khirkhyrova M.M. *Soils of the Rostov region: textbook*. Rostov on Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2008. – 352 p.
3. Burlakova E.B., Konradov A.A., Maltseva E.L. The effect of ultra-low doses of biologically active substances and low-intensity physical factors // *Chemical Physics*, 2003. V. 22. No. 2. – P. 21–40.
4. Vinogradov A.P. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust // *Geochemistry*, 1962. no. 7. – P. 555-571.
5. Gorbov S. N., Bezuglova O. S., Varduni T. V., Gorovtsov A. V., S. S. Tagiverdiev, Hildebrant Yu. A. Genotoxicity and Contamination of Natural and Anthropogenically Transformed Soils of the City of Rostov on Don with Heavy Metals // *Eurasian Soil Science*, 2015. Vol. 48, No. 12. – Pp. 1383–1392. DOI: 10.1134/S106422931512008X.
6. GOST R 53091-2008. Soil quality. Sample selection. Part 3: Safety Guide. M.: Standartinform, 2009. – 20 p.
7. Dmitriev E. A. *Mathematical statistics in soil science*. Moscow, 2010. – 336 p.
8. Dubenok N. N., Tobratov S. A., Mazhaisky Yu. A., Kononova G. A. Natural and technogenic factors of natural radioactivity of soils in the center of Russia // *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, 2010. No. 4. – P. 27–31.
9. Kapitinov I. M. *Nuclear Heat of the Earth, Radioactivity of Atomic Nuclei: Textbook*, ed. B. S. Ishkhanova. M.: Universitetskaya kniga, 2017. – Pp. 48–56.
10. Lyandzberg R.A. Components of the natural radiation background // *Bulletin of KamchatGTU*, 2006. No. 5 – P. 21–22.
11. Mason B. *Fundamentals of geochemistry*. M.: Nedra, 1971. – 311p.
12. Minoransky V. A. *Unique ecosystems: the Don Delta (natural resources and their conservation)*. Rostov-on-Don: Publishing house of LLC "TSVVR". 2004. – 234 p.
13. Panov V. D., Lurie P. M., Larionov Yu. A. *Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow*. Rostov-on-Don: Don Publishing House, 2006. – 487 p.

14. Perelman A. I. Geochemistry of elements in the zone of hypergenesis. M.: Nedra, 1972. – 288 p.
15. Prokoshev VV Agrochemistry of potash fertilizers: Abstract of the thesis. ... Dr. Biol. Sciences. M., 1984. – 40 p.
16. Prokoshev V. V., Deryugin I. P. Potassium and potash fertilizers. M.: Ledum, 2000. – 184 p.
17. Pchelkin V. U. Soil potassium and potash fertilizers. M.: Kolos, 1966. – 336 p.
18. Rikhvanov L.P. Radioactive elements in the environment and problems of radioecology. Tomsk: STT, 2009. – 430 p.
19. Romantsova N. A. Natural and technogenic radionuclides in the soils of the Plavsky radioactive spot TOC o "1-3" h z of the Tula region // Agrochemical Bulletin, 2012. No. 6. – P. 34–37.
20. Sokolovskaya S. N. The content of potassium-40 isotopes in soils of various types // Modern technologies of agricultural production: a collection of scientific articles based on the materials of the XXII International Scientific and Practical Conference (Grodno, June 7, March 29, 2019) Technology of storage and processing of agricultural products, agronomy, plant protection / VV Peshko. Grodno: GSAU, 2019. – P. 321–323.
21. Tagiverdiev S. S. Influence of urban pedogenesis on the morphological and physical properties of soils of the Rostov agglomeration: dis. ... cand. biol. Sciences: 03.02.13 – Rostov-on-Don, 2020. – 206 p.
22. Khlebny E. S., Sleptsov I. V., Zhuravskaya A. N. Influence of ionizing radiation of different exposure doses of natural radiation on the physiological and biochemical characteristics of a number of plant species in Yakutia // Radiation Biology. Radioecology, 2019. V. 59, No. 1. – P. 68–74.
23. Chernukha G. A., Lazarevich N. V. Radiation safety: practical work. Gorki: Belarusian State Agricultural Academy, 2010. – 116 p.
24. Chukhrov F. V. Colloids in the Earth's Crust. M., 1955. – 671 p.
25. Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I. Classification and diagnostics of Russian soils. Oikumena Smolensk, 2004. – 341 p.
26. Yakimenko VN Potassium in agrocenoses of Western Siberia. Novosibirsk: Publishing house of SO RAN, 2003. – 231 p.
27. Yaroshevsky A.A. On the geochemical evolution of the biosphere // Priroda, 1988. No. 2. – P. 59–67.

28. Ames L. L., Rai D. Radionuclide interactions with soil and rock media: U. S. Environmental Protection Agency // Report EPA 520/6-78-007A. 1978. V. 1. – 306 p.
29. Audi G., Kondev F.G., Wang M., Huang W.J., Naimi S. The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties // Chinese Physics, 2017. 41(3), 030001. doi:10.1088/1674-1137/41/3/030001
30. Bezuglova O. S., Tagiverdiev S. S., Gorbov S. N. Physical properties of urban soils in Rostov agglomeration // Eurasian Soil Science, 2018. 51 (9), 1105-1110. doi:10.1134/S1064229318090028
31. Buraeva E. A., Davydov M. G., Zorina L. V., Stasov V. V. Components of the Background of ge(Li) and Ge detectors in passive shielding // Atomic Energy, 2007. Vol. 103(5). – P. 895–900.
32. Clarke F. W., Washington H. S. The Composition of the Earth's Crust // U.S. Dep. interior. geol. Surv., 1924. T. 770. – S. 518.
33. Dickin A. P. Radiogenic Isotope Geology. 2nd ed. Cambridge University Press, 2005. – P. 29-31, 101-135, 275, 324-382. – 512 p.
34. FAO. Guidelines for soil description. Roma, 2006
35. Gorbov S. N. Genesis, classification and ecological role of urban soils of the European part of the South of Russia (on the example of the Rostov agglomeration): Doctoral dissertation. Moscow (in Russian), 2018. – 448 с.
36. Gorbov S. N., Abrosimov K. N., Bezuglova O. S., Skvortsova E. B., Tagiverdiev S. S., Tishchenko S. A. X-ray microtomography analysis of urban soils of the Rostov region // Geoderma Regional, 2022. 31, e00592. DOI: 10.1016/j.geodrs.2022.e00592
37. Gorbov S. N., Bezuglova O. S., Abrosimov K. N., Skvortsova E. B., Tagiverdiev S. S., Morozov I.V. Physical properties of soils in Rostov agglomeration // Eurasian Soil Science, 2016. Vol. 49, No. 8. – Pp. 898–907.
38. IUSS Working Group WRB: World Reference Base for Soil Resources, fourth edition. International Union of Soil Sciences, Vienna, 2022.
39. Prokof'eva T.V., Gerasimova M.I., Bezuglova O.S., Bakhmatova K.A., Gol'eva A.A., Gorbov S.N., Zharikova E.A., Matinyan N.N., Nakvasina E.N., Sivtseva N.E. Inclusion of soils and soil-like bodies of urban territories into the Russian soil classification system // Eurasian Soil Science, 47(10), 2014, pp 959–967.
40. Rich C.T. Effect of cation size and pH on potassium exchange in Nason soil // Soil Science, 98, 1964, pp 100-112.

41. Sources and effects of ionizing radiation UNSCEAR-2000 // Report to the general assembly with scientific annexes, 2000. Vol. 1. – 291 p.
42. Tagiverdiev S.S. Gorbov S.N. Bezuglova O.S. Skripnikov P.N. The content and distribution of various forms of carbon in urban soils of southern Russia on the example of Rostov agglomeration // Geoderma Regional, 2020. V. 21. e00266.