

Оригинальная статья / Original article
УДК 631.45:938.6
DOI: 10.18470/1992-1098-2021-2-75-87

Взаимосвязь климатических факторов почвообразования с формированием химических и физико-химических свойств почвенного покрова в агроландшафтах Центрального Черноземья

Олег Г. Чуян, Людмила Н. Караулова

Курский федеральный аграрный научный центр, Курск, Россия

Контактное лицо

Олег Г. Чуян, доктор биологических наук, зав. лабораторией агрохимии и геоинформационных систем, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Курский федеральный аграрный научный центр»; 305021 Россия, г. Курск, ул. Карла Маркса, д. 706.
Тел. +74712534580
Email agrochemgis@mail.ru
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4971-1888>

Формат цитирования

Чуян О.Г., Караулова Л.Н. Взаимосвязь климатических факторов почвообразования с формированием химических и физико-химических свойств почвенного покрова в агроландшафтах Центрального Черноземья // Юг России: экология, развитие. 2021. Т.16, N 2. С. 75-87. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-2-75-87

Получена 9 апреля 2020 г.
Прошла рецензирование 5 августа 2020 г.
Принята 21 сентября 2020 г.

Резюме

Цель. Провести оценку взаимосвязи химических и физико-химических параметров свойств почвенного покрова с климатическими факторами почвообразования в агроландшафтах ЦЧР.

Материалы и методы. Исследования выполняли с использованием системного анализа комплекса агроклиматических и почвенных параметров. Свойства почв оценивали по средневзвешенным характеристикам пахотных почв для территорий областей Центрального Черноземья. Гидротермические условия учитывались по количеству осадков, температуре и сумме активных температур за период 1960-2000гг.

Результаты. Расчетное превышение годовых осадков (440-640 мм) над испарением (407-500 мм) в среднемноголетнем цикле обеспечивает формирование полного стока и промываемости почв в размере 40-150 и 17-104 мм. От этого зависит кислотность почв (pH_{KCl} , $R^2 = 0,36...0,73$). Оптимальные условия гумусонакопления складываются при коэффициенте увлажнения 0,8-0,9. В более засушливых условиях его ограничивает поступление органического вещества, а более влажных – физико-химические условия. Мезорельеф является фактором пространственной неоднородности валового состава почв, с которым на 85% сопряжены физико-химические свойства и до 70% обеспеченность отдельными элементами минерального питания.

Заключение. Различия увлажнения территорий как в масштабе областей ЦЧР, так и на локальном уровне определяют интенсивность геохимического стока, окислительно-восстановительный режим и валовый химический состав почв, что является основой их неоднородности по содержанию органического вещества, кислотности и другим свойствам.

Ключевые слова

Климатические условия, пахотные почвы, химические свойства почв, рельеф, ресурсы агроландшафта.

Interrelation of climatic factors of soil formation with the formation of chemical and physical-chemical properties of soil cover in agricultural landscapes of the Central Chernozem Region of Russia

Oleg G. Chuyan and Lyudmila N. Karaulova

Kursk Federal Agricultural Research Centre, All-Russia Research Institute of Arable Farming and Soil Erosion Control, Kursk, Russia

Principal contact

Oleg G. Chuyan, Doctor of Biological Sciences, Head, Laboratory of Agrochemistry and Geoinformation Systems; 70b Karl Marx St, Kursk, Russia 305021.

Tel. +74712534580

Email agrochemgis@mail.ru

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4971-1888>

How to cite this article

Chuyan O.G., Karaulova L.N. Interrelation of climatic factors of soil formation with the formation of chemical and physical-chemical properties of soil cover in agricultural landscapes of the Central Chernozem Region of Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2021, vol. 16, no. 2, pp. 75-87. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2021-2-75-87

Received 9 April 2020

Revised 5 August 2020

Accepted 21 September 2020

Abstract

Aim. To assess the interrelations of chemical and physical-chemical parameters of soil cover properties with climatic factors of soil formation in agricultural landscapes of the Central Chernozem Region (CCR) of Russia.

Materials and Methods. The research was carried out using a systemic analysis of the complex of agroclimatic and soil parameters. Soil properties were assessed by the weighted average characteristics of arable soils for the areas of the Central Chernozem Region. Hydrothermal conditions were taken into account by rainfall, temperature and the amount of active temperatures for the period 1960-2000.

Results. Estimated excess of annual precipitation (440-640 mm) over evaporation (407-500 mm) in the average annual cycle ensures the formation of total runoff and soil washability in the amount of 40-150 and 17-104 mm. This determines soil acidity (pH_{KCL} , $R_2 = 0.36...0.73$). Optimal conditions of humus accumulation are formed when the humidity factor is 0.8-0.9. Mesorelief is a factor of spatial heterogeneity of the total soil composition with which 85% of physical-chemical properties and up to 70% of nutrient availability are associated.

Conclusion. The differences in the hydration of the territories both at the scale of the CCR and local levels determine the intensity of geochemical runoff, the oxidation-reduction regime and total chemical soil composition which constitute the basis of heterogeneity in the content of organic matter, acidic-base and other properties.

Key Words

Climatic conditions, arable soils, soil chemical properties, relief, agrolandscape resources.

ВВЕДЕНИЕ

Ресурсный потенциал агроландшафта характеризуется климатическими, почвенными, биологическими и антропогенными ресурсами, формирующимися в результате круговорота веществ и потоков энергии в агроэкосистемах и зависящими от рельефа, типа геохимического ландшафта, реализуясь в результате хозяйственной деятельности [1]. При этом сами почвенные ресурсы, как важнейшая природная составляющая, являются следствием развития почвообразовательного процесса. Выявление роли природных факторов в формировании почвенного покрова имеет важное значение для решения вопросов генетического почвоведения, географии почв, мониторинга состояния и прогнозов их изменений, а также рационального использования ресурсов агроландшафта.

В основе физико-географического районирования территорий лежит система взаимоотношений почв с факторами почвообразования, среди которых климатическим условиям отводят ведущую роль. При этом на формирование профиля почв наибольшее влияние оказывает разница между поступлением осадков и испаряемостью [2; 3].

Согласно В.А. Ковде, баланс веществ при почвообразовании является основным суммарным объектом эволюции почв. Наибольшее значение для осуществления связи между элементарными ландшафтами, составляющими геохимический ландшафт, имеет поверхностный и подземный сток. Таким образом, полный сток является одним из основных специфических факторов, оказывающим прямое и независимое воздействие климатических условий на эволюцию почв [4].

В настоящее время наблюдаются значимые тренды изменения климатических условий [5-7], которые способны смещать и динамические равновесия в почвах. Следовательно, решение проблемы параметризации и количественной оценки условий формирования почвенных свойств является необходимым условием как для оценки ресурсов агроландшафта, так и их рационального использования.

Цель настоящей работы заключается в оценке взаимосвязи климатических факторов почвообразования с формированием химических и физико-химических свойств почвенного покрова в агроландшафтах ЦЧР.

В задачи исследований входило:

- анализ параметров плодородия пахотных почв территорий районов областей ЦЧР;
- оценка различий валового состава и агрохимических свойств почвы на локальном уровне в зависимости от рельефа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполняли с использованием системного анализа комплекса агроклиматических и почвенных параметров. Свойства почв в связи с длительным влиянием различного климатического фона оценивали по средневзвешенным характеристикам пахотных почв для территорий районов областей Центрального Черноземья – Курской (n=28), Белгородской (n=18), Воронежской (n=32), Липецкой (n=18) и Тамбовской (n=23) (VII–VIII туры почвенно-агрохимического

обследования, 2000-2009 гг. [8-13]). Гидротермические условия территорий областей ЦЧР учитывались по количеству осадков, температуре и сумме активных температур за период 1960-2000 гг. [14].

Анализ свойств почвы в зависимости от местоположения в рельефе проводили на опытных участках ФБГНУ «Курский ФАНЦ» ВНИИЗиПЭ (Медвенский район, Курской области) в 2011-2017 гг. Почва – чернозем типичный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке, залегающий на разных элементах рельефа: водораздельном плато и склонах полярных экспозиций крутизной до 4°. За 32 года (1985-2017 гг.) количество годовых осадков варьировало от 422 до 752 мм, а коэффициент увлажнения от 0,62 до 1,32, гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова за весь период в среднем составил 1,12 при варьировании от 0,48 до 1,81 (24%) со значительным трендом по снижению -0,0136 в год, что было связано как с повышением суммы активных температур (7,9°C/год), так и со снижением количества осадков за тот же период (2 мм/год). Совокупное влияние климатических факторов на условия формирования и свойства почв оценивали по показателю промываемости почвы [15], как одному из основных факторов, определяющих интенсивность миграционных процессов в почвах. Полный сток оценивали по разнице между годовыми осадками и возможным испарением. Промываемость почв (мм) определяли по величине полного стока (мм) и гранулометрическому составу почвы (содержанию физической глины <0,01 мм, %) [16]. Почвенные свойства оценивали по следующим агрохимическим характеристикам: гумус – [17]; pH – в 1,0 н KCl вытяжке [18]; гидролитическая кислотность – [19]; сумма поглощенных оснований – [20]; подвижный калий и фосфор – [21]. Оформить как ссылки в соответствии с правилами журнала и добавить в списки литературы

Определение валового состава почв проводилось по измерению массовой доли оксидов металлов в порошковых пробах рентгенофлуоресцентным методом с использованием энергодисперсионного РФ спектрометра модели EDX-800HS «Shimadzu» (Япония). Эколого-генетическая оценка состава почв проводилась как по абсолютному содержанию окислов основных структурообразующих элементов (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, Mn, P), так и по их молекулярным отношениям [22]. Данные элементного состава представлены в виде процентного содержания оксидов на сухую почву.

Кроме этого, для оценки количественной дифференциации компонентов валового состава по профилю произведены расчеты накопления и выноса в почвенных горизонтах по формуле $E_a = ((R_1/R_0) - 1) \times 100\%$, где R_1 и R_0 содержание окислов в исследуемом и нижнем горизонте.

Статистическую обработку данных проводили методами вариационной статистики, корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа с использованием программ MS Excel, Statgraphics.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ генерализованных данных почвенных характеристик обширных территорий областей ЦЧР с широким размахом исходных условий для элиминирования различных условий хозяйствования с

целью качественной и количественной оценки влияния климатических факторов на пространственное

распределение основных характеристик почвенного покрова (табл. 1).

Таблица 1. Средние величины агроклиматических параметров (1960-2010 гг.), потерь оснований и варьирование физико-химических свойств пахотных почв по территории областей ЦЧР

Table 1. Average values of agroclimatic parameters (1960-2000), base loss and variation of physical-chemical properties of arable soils in the regions of the CCR

| Показатель Index | $\bar{X} \pm S_d$ | lim | V, % |
|---|-------------------|-------------|------|
| Курская область / Kursk region | | | |
| Сумма температур более 10°C / Sum of temperatures above 10°C | 2452±51 | 2346...2533 | 2,1 |
| Осадки за год, мм / Annual precipitation, mm | 602±12 | 578...634 | 2,0 |
| Полный сток, мм / Full drainage, mm | 121±22,5 | 82...155 | 18,6 |
| Промываемость почв, мм / Soil washability, mm | 70±19,3 | 41...104 | 27,5 |
| Кислотность почв, pH _{KCL} / Soil acidity, pH _{KCL} | 5,5±0,4 | 5,0...6,4 | 6,6 |
| Вымывание CaCO ₃ , кг/га / Leaching of CaCO ₃ , kg/ha | 200±44,3 | 122...295 | 22,2 |
| Белгородская область / Belgorod region | | | |
| Сумма температур более 10°C / Sum of temperatures above 10°C | 2616±102,4 | 2455...2827 | 3,9 |
| Осадки за год, мм / Annual precipitation, mm | 553±30,9 | 491...599 | 5,6 |
| Полный сток, мм / Full drainage, mm | 89±21,6 | 56...126 | 24,1 |
| Промываемость почв, мм / Soil washability, mm | 48±16,5 | 25...78 | 34,0 |
| Кислотность почв, pH _{KCL} / Soil acidity, pH _{KCL} | 5,9±0,4 | 5,3...6,7 | 6,9 |
| Вымывание CaCO ₃ , кг/га / Leaching of CaCO ₃ , kg/ha | 159±33,1 | 106...219 | 20,9 |
| Воронежская область / Voronezh region | | | |
| Сумма температур более 10°C / Sum of temperatures above 10°C | 2698±84,1 | 2580...2903 | 3,1 |
| Осадки за год, мм / Annual precipitation, mm | 513±28,2 | 447...571 | 5,5 |
| Полный сток, мм / Full drainage, mm | 67±14,9 | 40...102 | 22,1 |
| Промываемость почв, мм / Soil washability, mm | 33±9,9 | 17...57 | 30,3 |
| Кислотность почв, pH _{KCL} / Soil acidity, pH _{KCL} | 5,9±0,2 | 5,5...6,3 | 4,0 |
| Вымывание CaCO ₃ , кг/га / Leaching of CaCO ₃ , kg/ha | 111±23,3 | 70...169 | 21,0 |
| Липецкая область / Lipetsk region | | | |
| Сумма температур более 10°C / Sum of temperatures above 10°C | 2476±67,6 | 2374...2577 | 2,7 |
| Осадки за год, мм / Annual precipitation, mm | 563±19,9 | 529...597 | 3,5 |
| Полный сток, мм / Full drainage, mm | 105±14,6 | 82...133 | 13,9 |
| Промываемость почв, мм / Soil washability, mm | 60±12,0 | 42...84 | 20,1 |
| Кислотность почв, pH _{KCL} / Soil acidity, pH _{KCL} | 5,3±0,1 | 5,1...5,7 | 2,5 |
| Вымывание CaCO ₃ , кг/га / Leaching of CaCO ₃ , kg/ha | 148±26,1 | 114...203 | 17,6 |
| Тамбовская область / Tambov region | | | |
| Сумма температур более 10°C / Sum of temperatures above 10°C | 2537±61,7 | 2437...2667 | 2,4 |
| Осадки за год, мм / Annual precipitation, mm | 533±14,2 | 508...558 | 2,7 |
| Полный сток, мм / Full drainage, mm | 85±10,2 | 67...104 | 12,0 |
| Промываемость почв, мм / Soil washability, mm | 44±7,3 | 32...59 | 16,6 |
| Кислотность почв, pH _{KCL} / Soil acidity, pH _{KCL} | 5,5±0,2 | 5,3... 5,8 | 4,5 |
| Вымывание CaCO ₃ , кг/га / Leaching of CaCO ₃ , kg/ha | 120±16,7 | 82...150 | 13,9 |

В целом по территории ЦЧР линейные тренды изменения среднегодовой температуры и суммы активных температур за 50 лет составили +0,039° и +5,1°C в год соответственно. По результатам корреляционно-регрессионного анализа выявлено, что значения кислотности почв (pH) на 37% обусловлены годовыми осадками и на 44% – испаряемостью. В наибольшей мере они зависят от расчетных климатических параметров – разницы осадков и испаряемости (47%), а также промываемости (56%). Зависимость кислотности (pH_{KCL}) от полного стока и промываемости почв имеет логарифмическую форму и по отдельным областям характеризуется коэффициентом детерминации (R^2) от 0,36 до 0,73. Для всей территории ЦЧР характерна следующая зависимость:

$pH_{KCL} = 9,74 - 0,90 \cdot \ln(D)$, $F=168$, $R^2 = 0,58$,
где D – полный сток, мм.

Общая тенденция такова, что по мере роста увлажнения территорий, стока влаги и потерь оснований в северо-западных районах ЦЧР сформированы преимущественно серые лесные почвы и черноземы оподзоленные, обладающие кислой реакцией среды, а снижение увлажнения территорий в юго-восточном направлении характеризуется снижением кислотности почв и формированием черноземов выщелоченных, типичных и обыкновенных (рис. 1, 2).

В условиях периодически и особенно промывного водного режимов складывается отрицательный баланс оснований, что сопровождается выщелачиванием верхних горизонтов [23]. Расчетные потери оснований (кг/га CaCO₃) на территории ЦЧР варьируют от 70 до 300 кг/га и составляют в среднем для Курской, Белгородской, Воронежской, Тамбовской и Липецкой областей 200, 159, 111, 148 и 120 кг/га в год соответственно (рис. 3).

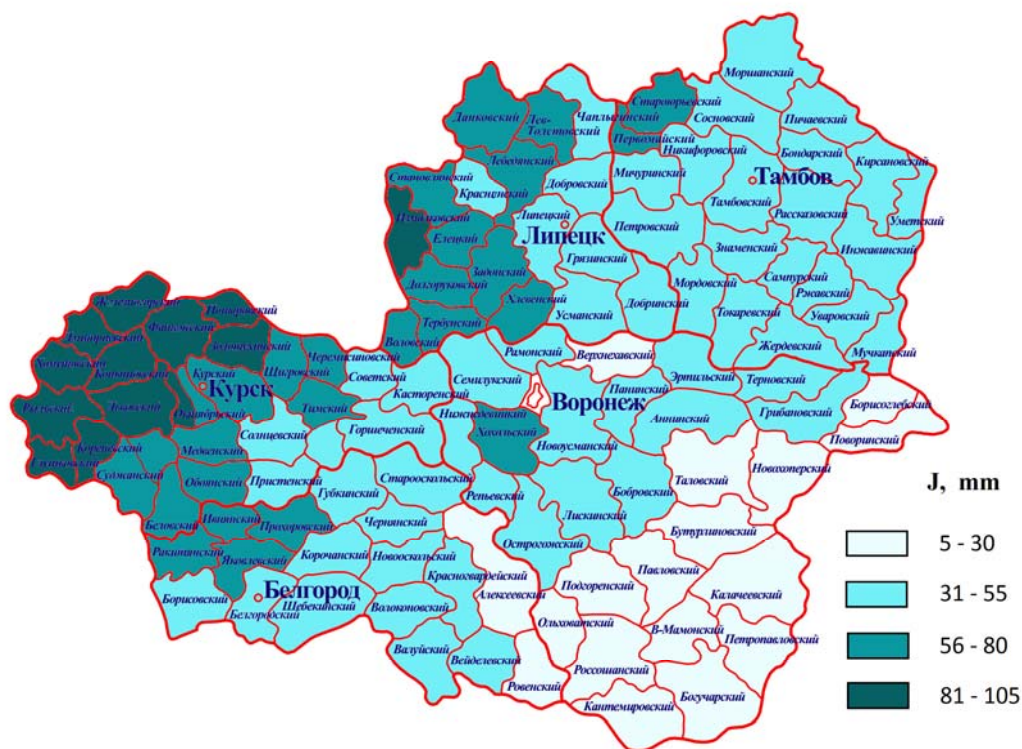


Рисунок 1. Промываемость почв по районам областей ЦЧР, мм

Figure 1. Soil washability for areas of the CCR, mm

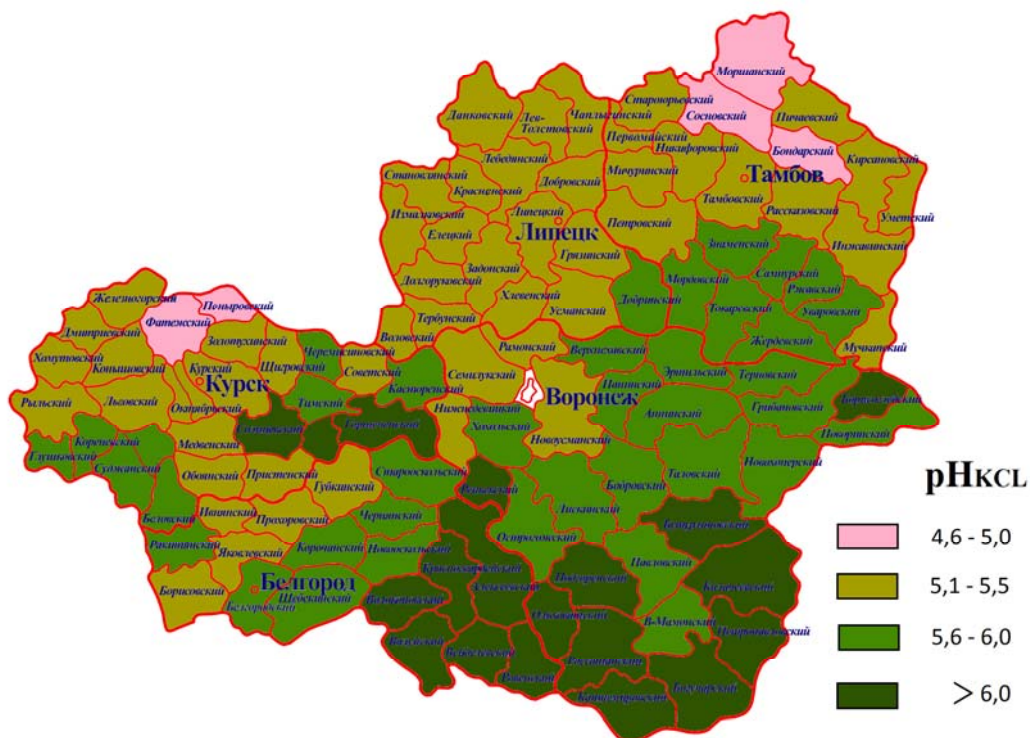


Рисунок 2. Распределение кислых почв на территории областей ЦЧР

Figure 2. Distribution of acidic soils over the areas of the CCR

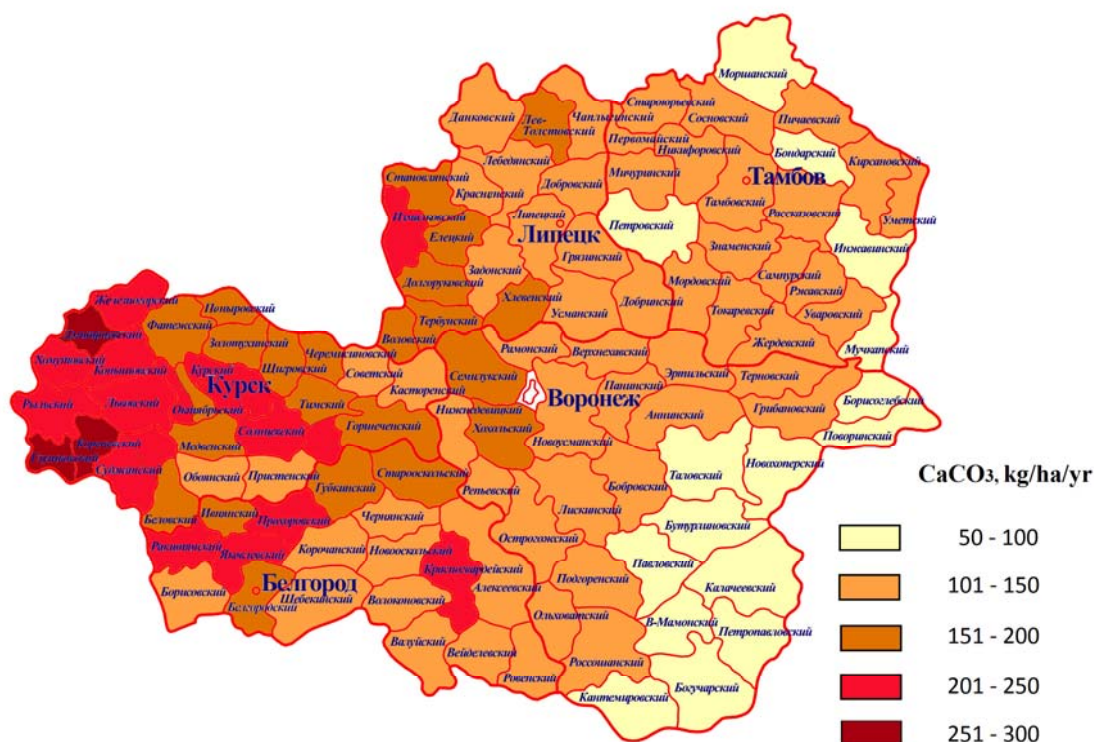


Рисунок 3. Расчетные потери оснований по областям ЦЧР (CaCO_3 , кг/га год)

Figure 3. Estimated base loss over the areas of the CCR (CaCO_3 , kg/ha/yr)

Содержание и запасы гумуса в почвах, в первую очередь, определяются экологическими условиями местоположений и гидротермическим режимом. Степень аэрации и увлажнения почв являются одними из основных факторов, определяющих окислительно-восстановительный режим [24]. Для относительной характеристики степени аэрации, увлажнения, и, соответственно, окислительно-восстановительного режима использовано соотношение полной влагоемкости почв (1 м слоя) к валовому увлажнению (ПВ/ВУ). Другим основным фактором является возможность поступления свежего органического вещества, которое можно оценить через

климатически обеспеченную продуктивность пашни [25].

Исходя из преобладающего гранулометрического состава почв районов областей ЦЧР и гидротермических условий, выявлено, что наибольшую относительную увлажненность (при меньшем значении ПВ/ВУ) имеют территории районов Курской области, которые также характеризуются наибольшей потенциальной продуктивностью. Однако, по окислительно-восстановительному режиму почв более благоприятные условия для гумификации имеются на территории Воронежской и Тамбовской областей (табл. 2; рис. 4, 5).

Таблица 2. Относительная увлажненность почв, климатически обеспеченная продуктивность пашни областей ЦЧР и среднее содержание гумуса, фосфора и калия в почве

Table 2. Table 2. Relative soil humidity, climate provided productivity of arable lands of the regions of the CCR and average content of humus, phosphorus and potassium in the soil

| Показатель Index | $X \pm S_d$ | lim | V, % |
|---|------------------|---------------|-------|
| Курская область / Kursk region | | | |
| ПВ/ВУ / TFMC/TM | $1,15 \pm 0,09$ | 1,00...1,31 | 8,2 |
| КОП / CPP | $5,75 \pm 0,54$ | 4,71...6,82 | 9,41 |
| Гумус / Humus | $4,61 \pm 0,96$ | 3,0...6,2 | 20,9 |
| P_2O_5 | $137,9 \pm 15,9$ | 108,0...170,6 | 11,5 |
| K_2O | $110,5 \pm 24,0$ | 78,0...152,5 | 21,8 |
| Белгородская область / Belgorod region | | | |
| ПВ/ВУ / TFMC/TM | $1,18 \pm 0,05$ | 1,11...1,28 | 3,9 |
| КОП / CPP | $5,63 \pm 0,54$ | 4,24...6,31 | 10,37 |
| Гумус / Humus | $4,86 \pm 0,43$ | 3,8...5,8 | 8,9 |
| P_2O_5 | $146,4 \pm 22,1$ | 107,0...183,0 | 15,1 |
| K_2O | $170,1 \pm 25,8$ | 127,0...239,0 | 15,1 |
| Воронежская область / Voronezh region | | | |
| ПВ/ВУ / TFMC/TM | $1,26 \pm 0,05$ | 1,17...1,35 | 4,1 |

| | | | |
|---|--------------|--------------|-------|
| КОП / CPP | 4,65±0,75 | 3,39...6,17 | 16,15 |
| Гумус / Humus | 5,56±0,87 | 4,0...7,4 | 15,7 |
| P ₂ O ₅ | 99,0 ± 13,7 | 71,0...121,0 | 13,8 |
| K ₂ O | 123,0 ± 12,4 | 95,0...145,0 | 10,1 |
| Липецкая область / Lipetsk region | | | |
| ПВ/ВУ / TFMC/TM | 1,19±0,04 | 1,14...1,28 | 2,9 |
| КОП / CPP | 5,72±0,30 | 4,98...6,13 | 5,32 |
| Гумус / Humus | 5,48±0,53 | 4,7...6,9 | 9,7 |
| P ₂ O ₅ | 96,4 ± 14,8 | 76,0...138,0 | 15,4 |
| K ₂ O | 119,7 ± 11,1 | 99,0...145,0 | 9,3 |
| Тамбовская область / Tambov region | | | |
| ПВ/ВУ / TFMC/TM | 1,29±0,03 | 1,24...1,35 | 2,1 |
| КОП / CPP | 4,94±0,37 | 4,18...5,57 | 7,47 |
| Гумус / Humus | 6,37±0,43 | 5,8...7,5 | 6,7 |
| P ₂ O ₅ | 89,1 ± 19,2 | 57,1...125,8 | 21,6 |
| K ₂ O | 105,1 ± 12,2 | 87,3...130,1 | 11,6 |

Примечание: ПВ/ВУ – отношение полной влагоёмкости к валовому увлажнению; КОУ – климатически обеспеченная продуктивность, т з.е./га; P₂O₅ – содержание подвижного фосфора, мг/кг; K₂O – содержание подвижного калия, мг/кг.

Note: TFMC/TM is the ratio of total field moisture capacity to total moistening; CPY is the climate provided yield, m g.u./ga.

P₂O₅ – is the content of mobile phosphorus, mg/kg; K₂O – is the content of mobile potassium, mg/kg.

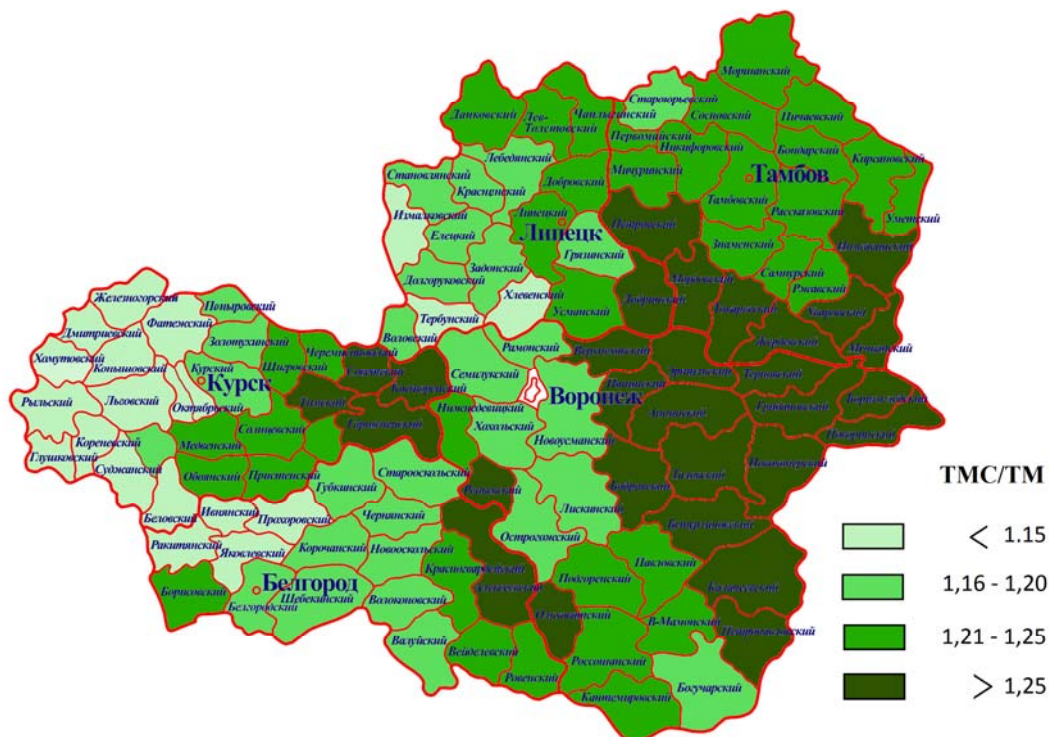


Рисунок 4. Отношение полной влагоёмкости к валовому увлажнению (ПВ/ВУ)

Figure 4. Ratio of total moisture capacity to total moistening (TMC/TM)

Для территориального распределения содержания гумуса в почвах по областям ЦЧР (рис. 6) характерна следующая зависимость:

$$Г\% = -21,2 + 17,2 (ПВ/ВУ) + 0,10 \cdot КОП$$

$$F = 290, R^2 = 0,82, P < 10^{-3}$$

где Г – содержание гумуса, %,

ПВ/ВУ – отношение полной влагоёмкости к валовому увлажнению,

КОП – продуктивность, климатически обеспеченная, ц з.е./га.

При этом вклад физических составляющих и гидротермических условий в территориальную изменчивость содержания гумуса составляет 60%, а биологических (КОП) – 29%.

При выражении содержания гумуса и климатически обеспеченной продуктивности в относительных величинах (относительно среднего по выборке) выявлено, что оптимальные условия накопления гумуса в связи с гидротермическими и физическими условиями (на основе данных областей ЦЧР) формируются для территорий с коэффициентом увлажнения 0,8-0,9. В более засушливых условиях ограничивает поступление органических веществ, а более влажных – физико-химические условия (рис. 7).

Такие важнейшие параметры питательного режима почв как содержание подвижных форм фосфора и калия при оценке в широком диапазоне исходных

условий также зависят от гидротермических условий и кислотности почвы:

$$P_2O_5 = -1416 - 121 \cdot (ПВ/ВУ) + 56,7 \cdot ГТК + 537 \cdot рН - 44,3 \cdot рН^2.$$

$$F=26, R=0,69,$$

$$K_2O = -903 + 89 \cdot (ПВ/ВУ) + 31,5 \cdot ГТК + 288 \cdot рН - 23,4 \cdot рН^2.$$

$$F=18, R=0,61,$$

где P_2O_5 и K_2O – содержание подвижных фосфора и калия, мг/кг;

ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова;

рН – кислотность солевой вытяжки.

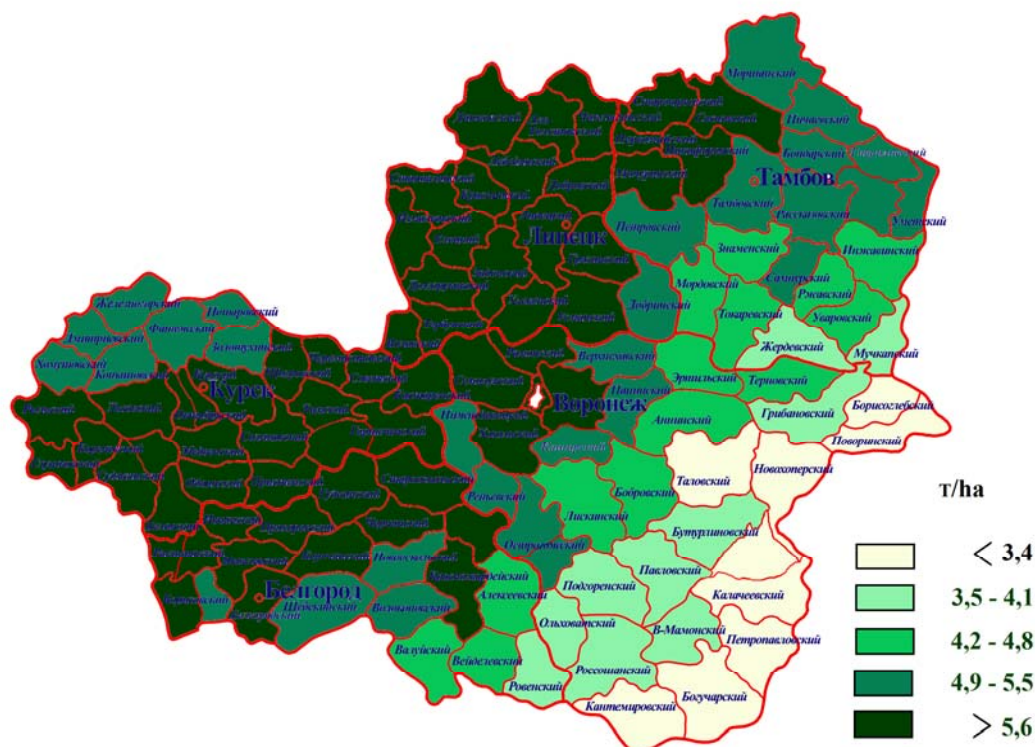


Рисунок 5. Продуктивность, климатически обеспеченная (т. з.е./га)

Figure 5. Productivity, climate-provided (grain unit t/ha)

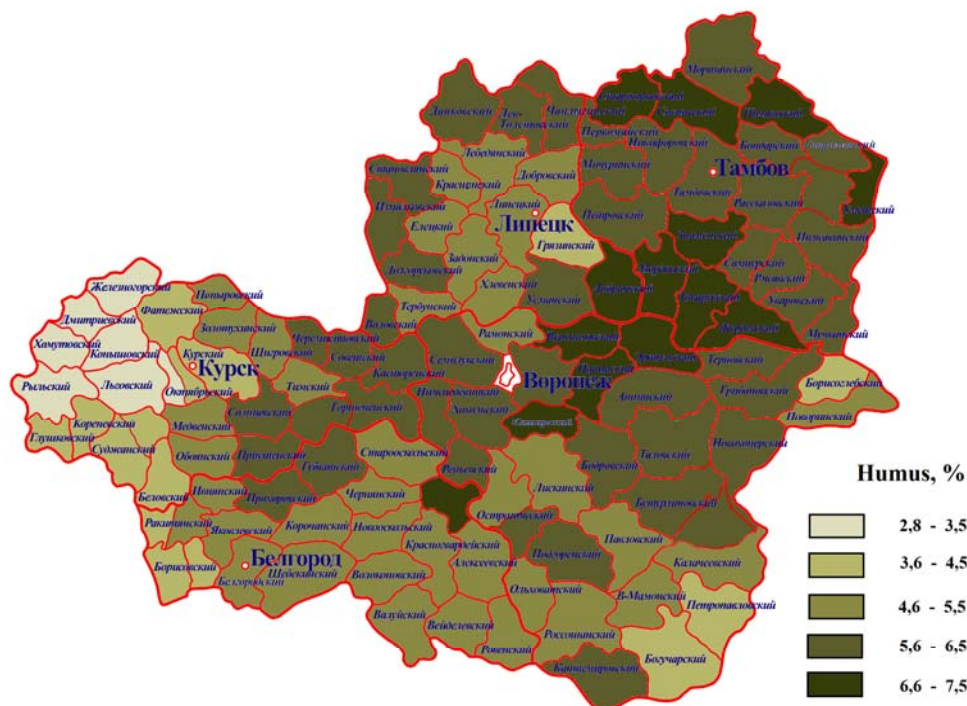


Рисунок 6. Содержание гумуса в почвах областей ЦЧР

Figure 6. Humus content in the soils of the CCR

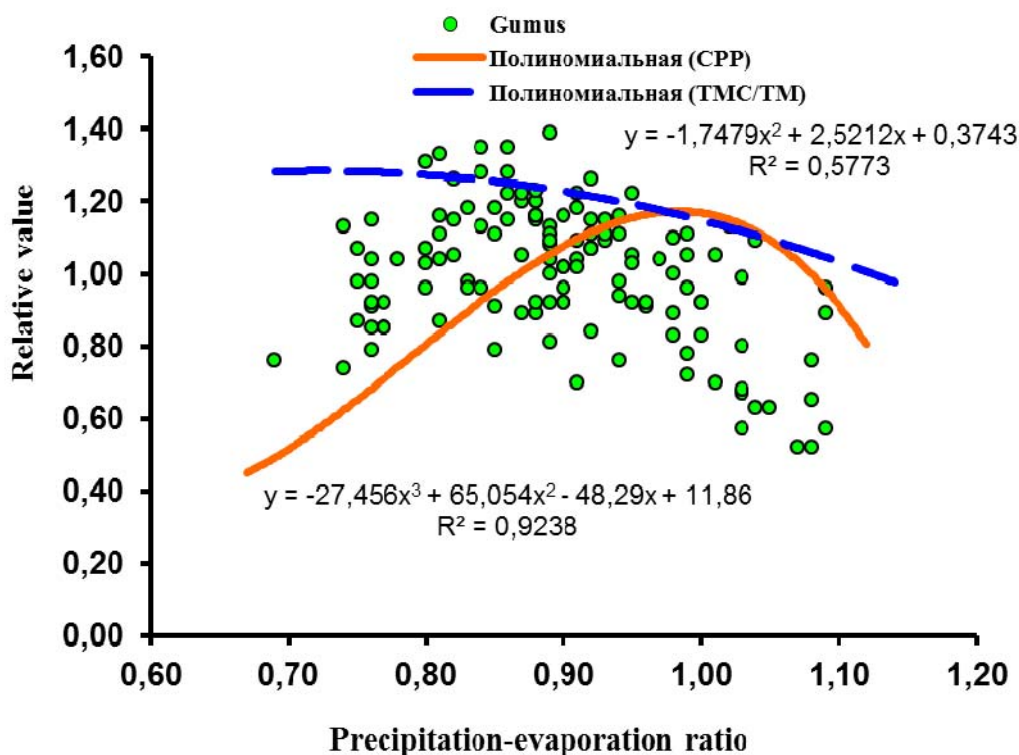


Рисунок 7. Относительное содержание гумуса в почвах областей ЦЧР
Figure 7. Relative humus content in the soils of the CCR

Если повышению увлажнения теплого периода (ГТК) соответствует рост обеспеченности обоих элементов, то для годового цикла (ВУ) это же снижает содержание калия. При этом максимальным значениям содержания фосфора и калия соответствует величины pH, равные 6,0 и 6,2 соответственно.

Мезорельеф является одним из основных факторов дифференциации гидротермических условий в зависимости от морфометрических параметров [26]. Это обуславливает значительную неоднородность

свойств почв для территорий со сложным рельефом, к которым относятся практически все области ЦЧР. Химический состав почв тесно связан с гидротермическими условиями их формирования, что подтверждает эколого-генетическая оценка валового состава чернозема типичного, залегающего на территориально сопряженных элементах рельефа (ОППХ ВНИИЗиЗПЭ, ФГБНУ «Курский ФАНЦ», Медвенский район, Курской области) (табл. 3).

Таблица 3. Химический состав чернозема типичного на разных элементах рельефа, %

Table 3. Chemical composition of typical chernozem soil on different elements of relief, %

| Глубина, см Depth, cm | | | Гумус, % Humus, % | pH _{HCL} | Валовой состав на абсолютно сухую почву, % Total composition for absolutely dry soil, % | | | | | | |
|--|--|------|------------------------------------|-------------------|--|--------------------------------|------------------|------|-------|-------------------------------|------|
| | | | Ca ²⁺ +Mg ²⁺ | | | | | | | | |
| | | | мг-экв/100г | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | CaO | MgO | P ₂ O ₅ | |
| Северный склон / Northern slope | | | | | | | | | | | |
| 0-20 | | 5,08 | 5,2 | 26,0 | 71,46 | 13,33 | 5,82 | 3,62 | 1,94 | 1,28 | 0,36 |
| 20-40 | | 4,54 | 5,5 | 27,1 | 71,11 | 13,59 | 5,85 | 3,51 | 2,01 | 1,29 | 0,37 |
| 40-60 | | 3,67 | 6,3 | 26,8 | 70,93 | 13,81 | 5,91 | 3,60 | 1,91 | 1,36 | 0,19 |
| 60-80 | | 2,77 | 7,0 | 25,8 | 69,62 | 13,54 | 6,19 | 3,62 | 3,01 | 1,38 | 0,31 |
| 80-100 | | 2,01 | 7,4 | 24,3 | 64,99 | 13,01 | 6,48 | 3,45 | 8,08 | 1,44 | 0,34 |
| Водораздельное плато / Watershed plateau | | | | | | | | | | | |
| 0-20 | | 5,32 | 5,7 | 28,6 | 70,33 | 13,19 | 6,67 | 3,56 | 2,12 | 1,29 | 0,4 |
| 20-40 | | 4,90 | 5,9 | 28,1 | 70,69 | 13,40 | 6,20 | 3,60 | 2,15 | 1,35 | 0,36 |
| 40-60 | | 3,95 | 6,8 | 27,3 | 69,65 | 13,38 | 6,25 | 3,66 | 2,96 | 1,38 | 0,38 |
| 60-80 | | 2,75 | 7,3 | 24,8 | 66,26 | 12,83 | 6,21 | 3,56 | 7,11 | 1,43 | 0,33 |
| 80-100 | | 2,00 | 7,5 | 22,7 | 63,84 | 12,47 | 6,30 | 3,37 | 10,21 | 1,45 | 0,32 |
| Южный склон / Southern slope | | | | | | | | | | | |
| 0-20 | | 4,76 | 7,2 | 30,1 | 68,71 | 13,68 | 6,58 | 3,65 | 3,11 | 1,47 | 0,45 |
| 20-40 | | 4,15 | 7,3 | 29,3 | 67,8 | 13,36 | 6,58 | 3,59 | 4,46 | 1,43 | 0,44 |
| 40-60 | | 3,22 | 7,4 | 26,8 | 65,39 | 13,03 | 6,58 | 3,53 | 7,31 | 1,43 | 0,44 |
| 60-80 | | 2,46 | 7,5 | 25,1 | 64,5 | 12,87 | 6,49 | 3,45 | 8,54 | 1,47 | 0,46 |
| 80-100 | | 1,71 | 7,6 | 24,0 | 63,32 | 12,73 | 6,47 | 3,39 | 9,86 | 1,57 | 0,43 |

Выявлено, что большие значения молекулярных отношений окиси кремния к содержанию полутораоксидов ($\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$) по элементам рельефа характерны для почвы северного склона – 7,13, для водораздельного плато и склона южной экспозиции – несколько меньше 6,85 и 6,53. Аналогично перераспределяются химические элементы в процессе элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля – в большей мере в условиях более влажного северного склона (рис. 8).

Это было обусловлено, в основном, потерей окиси железа в почве северной экспозиции до 10% и некоторому росту, относительно породы – на южной экспозиции +2%. Показатели выноса и накопления компонентов валового состава почв комплекса, рассчитанные относительно их содержания в нижнем горизонте, показывают перемещение, накопление, увеличение или уменьшение вещественного состава почвы, что обусловлено развитием элювиально-иллювиальных процессов. При этом наиболее чувствительными к гидротермическому режиму являются абсолютное и относительное содержание щелочных и щелочноземельных элементов, которым соответствуют максимальные потери (рис. 9). Данные коэффициента миграции ($\text{CaO}+\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) показывают, что перераспределение окислов кальция и магния наиболее выражено по профилю почвы на склоне северной экспозиции.

Степень выщелоченности пахотного слоя почвы на склоне северной экспозиции, водораздельном плато, а также на склоне южной экспозиции по окислам кальция и магния составляет 76 и 11, 79 и 11, а также 68 и 6% соответственно, при этом профили чернозема типичного имеют данную степень выноса до глубины 70, 50 и 30 см соответственно (рис. 9).

Наибольшие запасы гумуса в слое 0-100 см отмечены на водораздельном плато – 438 т/га, а на северном и южном склонах 423 и 388 т/га – соответственно.

Установлено, что для приведенных данных (табл. 3) верхних горизонтов почв (0-20 и 20-40 см) кислотность (pH_{KCl}) почв тесно и положительно связана с содержанием суммы окислов кальция и магния ($R^2=0,85$). В условиях северного склона величина pH почвы на 0,5 ед. ниже, а на южном склоне на 1,5 ед. выше, чем в условиях водораздельного плато. При этом содержание обменных оснований (мг-экв/100 г) в профилях почв зависит от pH_{KCl} и содержания гумуса:

$$Y = 5,18 + 2,4 \cdot G + 1,9 \cdot \text{pH}, F=50,8, R^2=0,85$$

Содержание (мг/100 г) и запасы обменного калия также прямо зависят от содержания гумуса (%) и снижаются с ростом молекулярных отношений окиси кремния к полутораоксидам, то есть, тесно связаны с минералогическим составом и типом глинистых минералов:

$$Y = 52,6 + 2,44 \cdot G - 7,5 \cdot (\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3), F=13,4, R^2=0,69$$

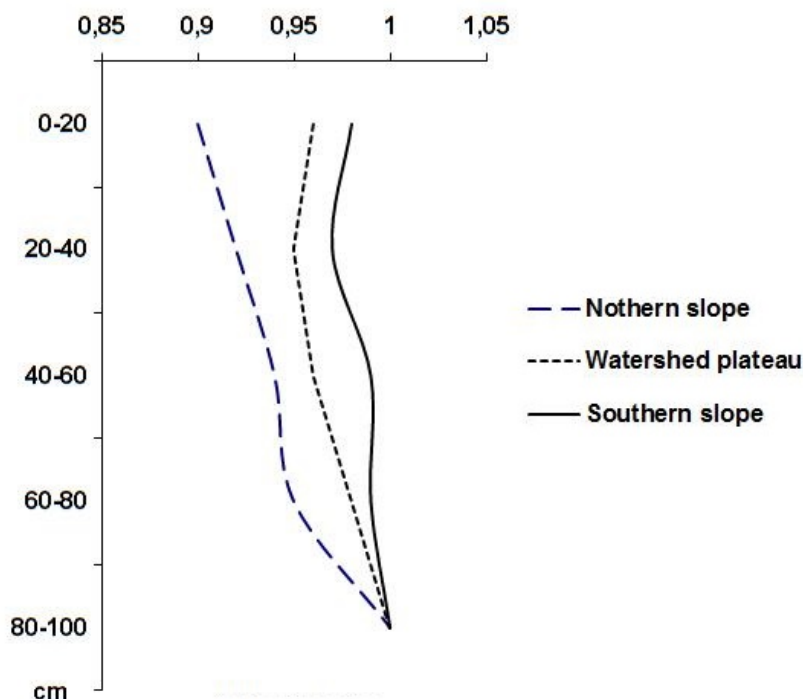


Рисунок 8. Коэффициент элювиально-иллювиальной миграции в профиле чернозема типичного на разных элементах рельефа ($\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$ в породе к $\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$ в горизонте)

Figure 8. Coefficient of eluvial-illuvial migration in the profile of typical chernozem on different elements of relief ($\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$ in the rock to $\text{SiO}_2 : \text{R}_2\text{O}_3$ in the horizon)

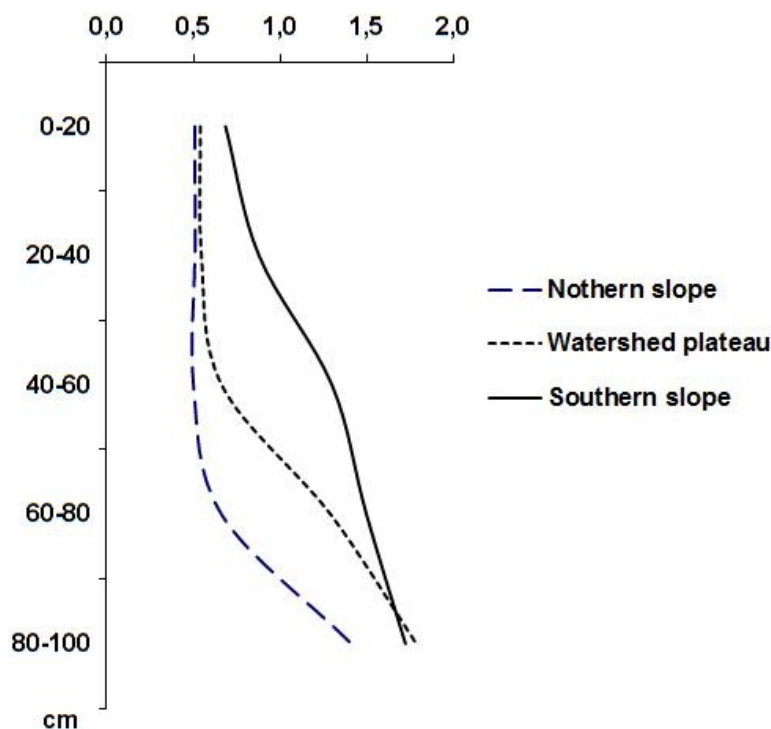


Рисунок 9. Потери и накопление щёлочноземельных элементов в продуктах выветривания $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3$
Figure 9. Loss and accumulation of alkali-earth elements in products of weathering $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3$

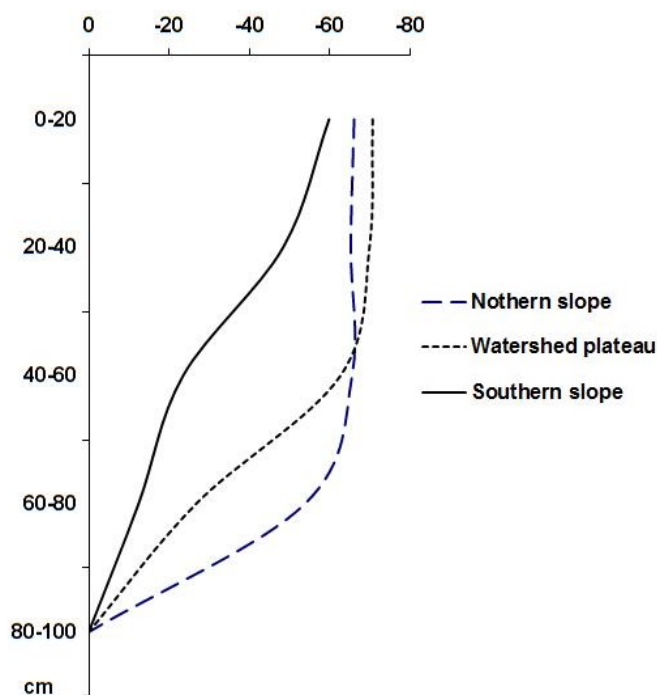


Рисунок 10. Степень выноса щёлочноземельных элементов $(\text{CaO} + \text{MgO})$ в профиле чернозема типичного на разных элементах рельефа, %

Figure 10. Degree of the removal of alkali-earth elements $(\text{CaO} + \text{MgO})$ in the profile of typical chernozem on different elements of relief, %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При варьировании среднееголетних величин по районам областей ЦЧР годовых осадков от 440 до 640 мм и испаряемости от 560 до 700 мм в среднееголетнем цикле испарение влаги составляет

только 407-500 мм. Расчетное превышение осадков обеспечивает формирование полного стока и промываемости почв в размере 40-150 и 17-104 мм. Различия увлажнения территории как в региональном масштабе областей ЦЧР, так и на локальном уровне

определяют интенсивность геохимического стока, окислительно-восстановительный режим и валовый химический состав почв, что является основой их неоднородности по содержанию органического вещества, физико-химическим свойствам и другим агрономическим качествам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. Москва: Мысль, 1990. 639 с.
2. Alyabina I.O., Nedanchuk I.M. Assessment of the relationships between the distribution of soil horizons and the climatic parameters // *Eurasian Soil Science*. 2014. V. 47. N 10. P. 968-979. DOI: 10.1134/S1064229314080018
3. Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. Soil-geographical zoning as a direction of science and as the basis for rational land use // *Eurasian Soil Science*. 2015. V. 48. N 9. P. 897-910. DOI: 10.1134/S1064229315090112
4. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1975. 344 с.
5. Sirotenko O.D., Abashina E.V., Pavlova V.N., Gruza G.V., Rankova E.Ya. Modern climate-related changes in heat supply, moistening, and productivity of the agrosphere in Russia // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007. V. 32. N 8. P. 538-546. DOI: 10.3103/S1068373907080109
6. Chendev Y.G., Lupo A.R., Lebedeva M.G., Borbukova D.A. Regional specificity of the climatic evolution of soils in the southern part of eastern Europe in the second half of the Holocene // *Eurasian Soil Science*. 2015. V. 48. N 12. P. 1279-1291. DOI: 10.1134/S1064229315120042
7. Smirnova L.G., Kukharuk N.S., Chendev Yu.G. Soil Cover in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland against the background of centennial climate fluctuations // *Eurasian Soil Science*. 2016. V. 49. N 7. P. 721-729. DOI: 10.1134/S1064229316070103
8. Чекмарев П.А., Лукин С.В., Сискевич Ю.И., Юмашев Н.П., Корчагин В.И., Хижняков А.Н. Мониторинг кислотности пахотных почв Центрально-Черноземного района // *Достижение науки и техники АПК*. 2011. N 7. С. 6-8.
9. Чекмарев П.А., Лукин С.В., Сискевич Ю.И., Юмашев Н.П., Корчагин В.И., Хижняков А.Н. Мониторинг содержания органического вещества в пахотных почвах ЦЧР // *Достижение науки и техники АПК*. 2011. N 9. С. 23-26.
10. Корчагин В.И. Динамика агрохимического состояния пахотных почв Воронежской области // *Достижение науки и техники АПК*. 2015. T. 29. N 11. С. 11-13.
11. Чекмарев П.А., Сискевич Ю.И., Бровченко Н.С., Гасиев К.Н., Никулова В.А. Мониторинг агрохимических показателей почв Липецкой области // *Достижение науки и техники АПК*. 2016. T. 30. N 8. С. 9-16.
12. Чекмарев П., Лукин С. Динамика плодородия пахотных почв, использования удобрений и урожайности основных сельскохозяйственных культур в центрально-черноземных областях России // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2017. N 4. С. 41-44.
13. Пироженов В.В., Цыганков Д.Н., Мирошниченко О.Н. Мониторинг состояния плодородия пахотных почв Курской области // *Достижение науки и техники АПК*. 2019. T. 33. N 4. С. 12-15. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10403
14. Архив погоды по городам России. URL: <https://climate-energy.ru> (дата обращения: 30.04.2019)
15. Голованов А.И. Водообмен и оросительные нормы // *Природообустройство*. 2008. N 3. С. 5-14.
16. Чуюн О.Г. К вопросу оценки динамики кислотности пахотных почв // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. T. 33. N 12. С. 5-9. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11201

17. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1993. 8 с.
18. ГОСТ 26483-85. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 8 с.
19. ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1993. 6 с.
20. ГОСТ 27821-2020. Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. М.: Стандартинформ, 2020. 9 с.
21. ГОСТ 26204-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1993. 6 с.
22. Вальков В.Ф., Крыщенко В.С. Методы оценки валового состава почв в генетических исследованиях. Методические указания к научно-исследовательской работе по почвоведению. Ростов н/Д., изд-во РГУ. 1983, 22 с.
23. Чуюн О.Г. База данных для регулирования физико-химических свойств кислых почв в адаптивно-ландшафтном земледелии (для Центрального Черноземья). Курск: ГНУ ВНИИЗиЗПЭ РАСХН, 2012. 78 с.
24. Кауричев И.С., Орлов Д.С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. Москва: Колос, 1982. 247 с.
25. Чуюн О.Г., Дериглазова Г.М. Оценка агроклиматического потенциала продуктивности пашни для модели управления агрохимическими свойствами почв // *Земледелие*. 2018. N 7. С. 6-11. DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10702
26. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. Iss. 1-2. P. 1-32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7

REFERENCES

1. Reimers N.F. *Prirodopolzovanie. Slovar'-spravochnik* [Environment Conservation. Reference book]. Moscow, Mysl' Publ., 1990, 639 p. (In Russian)
2. Alyabina I.O., Nedanchuk I.M. Assessment of the relationships between the distribution of soil horizons and the climatic parameters. *Eurasian Soil Science*, 2014, vol. 47, no. 10, pp. 968-979. DOI: 10.1134/S1064229314080018
3. Urusevskaya I.S., Alyabina I.O., Shoba S.A. Soil-geographical zoning as a direction of science and as the basis for rational land use. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, no. 9, pp. 897-910. DOI: 10.1134/S1064229315090112
4. Perel'man A.I. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of the landscape]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975, 344 p. (In Russian)
5. Sirotenko O.D., Abashina E.V., Pavlova V.N., Gruza G.V., Rankova E.Ya. Modern climate-related changes in heat supply, moistening, and productivity of the agrosphere in Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2007, vol. 32, no. 8, pp. 538-546. DOI: 10.3103/S1068373907080109
6. Chendev Y.G., Lupo A.R., Lebedeva M.G., Borbukova D.A. Regional specificity of the climatic evolution of soils in the southern part of eastern Europe in the second half of the Holocene. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, no. 12, pp. 1279-1291. DOI: 10.1134/S1064229315120042
7. Smirnova L.G., Kukharuk N.S., Chendev Yu.G. Soil Cover in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland against the background of centennial climate fluctuations. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 7, pp. 721-729. DOI: 10.1134/S1064229316070103

8. Chekmarev P.A., Lukin S.V., Siskevich Y.I., Yumashev N.P., Korchagin V.I., Khizhnyakov A.N. Monitoring of the acidity of arable soils of the Central Chernozem Region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Dostizheniya nauki i tekhniki APK]. 2011, no. 7, pp. 6-8. (In Russian)
9. Chekmarev P.A., Lukin S.V., Siskevich Yu.I., Yumashev N.P., Korchagin V.I., Khizhnyakov A.N. Monitoring of organic matter content in arable soils in CCR. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Dostizheniya nauki i tekhniki APK]. 2011, no. 9, pp. 23-26. (In Russian)
10. Korchagin V.I. Dynamics of the agrochemical state of arable soils of Voronezh Region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Dostizheniya nauki i tekhniki APK]. 2015, vol. 29, no. 11, pp. 11-13. (In Russian)
11. Chekmarev P.A., Siskevich Yu.I., Brovchenko N.S., Gasiev K.N., Nikulova V.A. Monitoring of agrochemical characteristics of soils in Lipetsk Region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Dostizheniya nauki i tekhniki APK]. 2016, vol. 30, no. 8, pp. 9-16. (In Russian)
12. Chekmarev P.A., Lukin S.V. Dynamics of the fertility of arable soils, fertilizer application and yield of major crops in central-chernozem regions of Russia. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* [International Agricultural Journal]. 2017, no. 4, pp. 41-44. (In Russian)
13. Pirozhenko V.V., Tsygankov D.N. and Miroshnichenko O.N. Monitoring the state of the fertility of arable soils in Kursk Region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2019, vol. 33, no. 4, pp. 12-15. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10403
14. *Arkhiv pogody po gorodam Rossii* [Weather Archive for Russian Cities]. Available at: <https://climate-energy.ru> (accessed 30.04.2019)
15. Golovanov A.I. Water exchange and irrigation norms. *Prirodoobustroistvo* [Environmental management]. 2008, no. 3, pp. 5-14. (In Russian)
16. Chuyan O.G. Assessment of the acidity dynamics of arable soils in the Central Chernozem Region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2019, vol. 33, no. 12, pp. 5-9. (In Russian) DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11201
17. GOST 26213-91. *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* [GOST 26213-91. Soils. Methods for determination of organic matter]. Moscow, Committee of Standardization and Metrology of the USSR Publ., 1993, 8 p. (In Russian)
18. GOST 26483-85. *Prigotovlenie solevoi vytyazhki i opredelenie ee rN po metodu TsINAO* [GOST 26483-85. Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by CINAO method]. Moscow, State Committee of the USSR for Standards Publ., 1986, 8 p. (In Russian)
19. GOST 26212-91. *Pochvy. Opredelenie gidroliticheskoi kislotsnosti po metodu Kappena v modifikatsii TsINAO* [GOST 26212-91. Soils. Determination of hydrolytic acidity by Kappen method modified by CINAO]. Moscow, Committee of Standardization and Metrology of the USSR Publ., 1993, 6 p. (In Russian)
20. GOST 27821-2020. *Pochvy. Opredelenie summy pogloshchennykh osnovanii po metodu Kappena* [GOST 27821-2020. Soils. Determination of base absorption sum by Kappen method]. Moscow, Standartinform Publ., 2020, 9 p. (In Russian)
21. GOST 26204-91. *Pochvy. Opredelenie podvizhnykh soedinenii fosfora i kaliya po metodu Chirikova v modifikatsii* [GOST 26204-91. Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Chiricov method modified by CINAO]. Moscow, Committee of Standardization and Metrology of the USSR Publ., 1993, 6 p. (In Russian)
22. Valkov V.F., Kryshchenko V.S. [Methods for estimating the gross soil composition in genetic studies]. In: *Metodicheskie ukazaniya k nauchno-issledovatel'skoi rabote po pochvovedeniyu* [Guidelines for research work in soil science]. Rostov-on-the-Don, RSU Publ., 1983, 22 p. (In Russian)
23. Chuyan O.G. *Baza dannykh dlya regulirovaniya fiziko-khimicheskikh svoystv kisllykh pochv v adaptivno-landshaftnom zemledelii (dlya Tsentral'nogo Chernozemya)* [Database for the regulation of physical and chemical properties of acidic soils in adaptive landscape agriculture (for the Central Chernozem Region of Russia)]. Kursk, 2012, 78 p. (In Russian)
24. Kaurichev I.S., Orlov D.S. *Okislitel'no-vosstanovitel'nye protsessy i ikh rol' v genezise i plodorodii pochv* [Oxidation-reduction processes and their role in soil genesis and fertility]. Moscow, Kolos Publ., 1982, 247 p. (In Russian)
25. Chuyan O.G., Deriglazova G.M. Assessment of agroclimatic potential of arable land productivity for a model of management of agrochemical soil properties. *Zemledelie*, 2018, no. 7, pp. 6-11. (In Russian) DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10702
26. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, vol. 107, iss. 1-2, pp. 1-32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Олег Г. Чуян разработал концепцию статьи, проанализировал данные, написал рукопись. Людмила Н. Караулова участвовала в сборе материалов, анализе данных, научном дизайне, корректуре рукописи. Авторы в равной степени несут ответственность за плагиат, самоплагиат и другие неэтические проблемы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Oleg G. Chuyan developed the concept of the paper, analysed the data and wrote the manuscript. Ludmila N. Karaulova participated in the collection of the materials, analysis of data, scientific design and correction of the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism and self-plagiarism or other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Олег Г. Чуян / Oleg G. Chuyan <https://orcid.org/0000-0002-4971-1888>

Людмила Н. Караулова / Lyudmila N. Karaulova <https://orcid.org/0000-0003-0633-109X>