

УДК 631.417.1

## ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВАЯ ДИНАМИКА БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА В СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТАХ ЮГА РУССКОЙ РАВНИНЫ

© Л.С. Песочина

*Ключевые слова:* биогеохимический цикл углерода; педохроноряд; голоцен; черноземы.

На основе изучения палеопочв, погребенных под разновозрастными археологическими памятниками, впервые установлены масштабы, направленность и скорости изменчивости углеродного резервуара черноземов и его основных составляющих (гумусовых и карбонатных соединений) в различных слоях почвенного профиля на территории юга Русской равнины во второй половине голоцена.

### ВВЕДЕНИЕ

Выдающийся ученый В.И. Вернадский создал новую науку – биогеохимию, изучающую биогеохимические процессы на Земле и объединяющие мир живых организмов и косной природы. В своих исследованиях он особую роль отводил биогеохимическим циклам углерода в природе [1]. В настоящее время проблема глобального цикла углерода стала еще актуальней в связи с потеплением климата и необходимостью мониторинга потоков диоксида углерода на Земле.

В биогеохимических циклах углерода педосфера выполняет ряд важных функций. Она является резервуаром для стока и трансформации атмосферного углерода, аккумулированного при фотосинтезе наземной растительности; генератором и аккумулятором стабильных соединений углерода в форме гумуса и карбонатов; генератором и аккумулятором подвижных соединений углерода в виде газов и прежде всего  $\text{CO}_2$ , поступающих в атмосферу и включающихся в циклы воздушной миграции, а также водорастворимых органических и минеральных соединений углерода, участвующих в гидрохимическом стоке в местные водоемы, моря и океаны [2].

Почвенный покров представляет собой один из глобальных резервуаров углерода в биосфере и является практически вторым по величине после океана [3]. Запасы углерода в почвах складывались столетиями и тысячелетиями. Ведущую роль в формировании масштабов их емкости и направленности основных потоков играла и играет динамика климатических условий.

Поэтому важной научной задачей является установление масштабов и направленности изменчивости углеродного резервуара почв и основных ее составляющих (гумусовых и карбонатных соединений), обусловленных климатическими флуктуациями.

При исследовании круговорота углерода необходимо дифференцировать резервуары на 1) резервный фонд – большая масса медленно движущихся веществ и 2) подвижный или обменный фонд – меньший, но более активный, а также проводить количественное изучение скорости циркуляции имеющихся запасов.

Уникальными объектами для решения этих задач являются голоценовые педохроноряды, включающие палеопочвы, погребенные под разновозрастными археологическими памятниками и являющиеся природными моделями изменчивости ландшафтов как прошлого, так и основой для прогноза поведения систем в будущем. К сожалению, до настоящего времени они слабо привлекаются для оценки глобальных биогеохимических циклов углерода.

*Основная цель работы* заключалась в исследовании закономерностей динамики запасов углерода черноземов Приазовья, а также отдельных ее составляющих, обусловленных климатическими флуктуациями в позднем голоцене.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Археологические раскопки проводились в Неклиновском и Мясниковском районах Ростовской области на территории Приазовской равнины. Это – сухостепная зона с черноземами обыкновенными и южными. Черноземы, как известно, характеризуются высокой биологической продуктивностью, значительными резервами кальция и благоприятны для формирования высокого буферного резервуара углерода.

Объектами изучения послужили палеопочвы курганных могильников бронзового (XX–XVII вв. до н. э.) и среднесарматского времени (I в.н.э.), скифского некрополя (IV в. до н. э.) и вала, сооруженного в XVII в. и перекрывшего почвы под культурными слоями VIII и XII вв. н. э. Исследованные почвы развивались в близких литолого-геоморфологических условиях, что позволило объединить их в единый педохроноряд, включивший следующие временные срезы: 4000 (3700), 2400, 2000, 1900, 1200 лет назад и современность.

Основным методом исследования послужил почвенно-археологический [4–5]. В образцах, взятых по генетическим горизонтам, проводились химические анализы почв: определение группового состава и содержания гумуса, поглощенных оснований, карбонатов, гипса, состава водной вытяжки, гранулометрического состава.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде чем перейти к анализу углеродного резервуара черноземов Приазовья, рассмотрим основные закономерности изменчивости основных ее составляющих: гумусового и карбонатного профилей.

*Гумусовый профиль.* В течение последних 40 веков почвы исследуемой территории не выходили за пределы ранга среднемощных малогумусированных. Скорость роста гумусоаккумулятивной толщи не превышала 3 см/100 лет, варьируя в отдельные периоды от 0,5 до 3 см/100 лет, скорость уменьшения мощности гумусового горизонта колебалась от 1 до 2 см/100 лет.

От 40 до 70 % современных запасов гумуса в метровой толще были сформированы уже к рубежу III–II тыс. до н. э. В последующие 4000 лет развитие верхней толщи характеризовалось цикличностью: в благоприятные климатические периоды (2400, 1900 лет назад) содержание гумуса возрастало до 4,2 %, запасы увеличивались на треть, доминировал процесс гумусоаккумуляции. При аридизации (4000, 2000, 1200 лет назад) ускорялся процесс минерализации гумусовых веществ, содержание гумуса сокращалось до 3,0 %, запасы не превышали 18 кг/м<sup>2</sup>. Амплитуда изменчивости запасов гумуса в прошлом не превышала 30 % их количества в современных фоновых почвах (рис. 1).

Нижний полуметровый слой имел поступательный (неравномерный) характер развития. Наиболее интенсивно пополнялись запасы в интервале времени с I по VIII вв. н. э., скорость при этом достигала 0,5 кг/м<sup>2</sup> за 100 лет. В этот же период резко возрастает мощность толщи с содержанием гумуса более 1 %. Основным механизмом формирования нижней части гумусовой толщи был процесс иллювиования пептизированного органического вещества в периоды развития солонцового процесса и дальнейшая его биотурбация [6].

*Карбонатный профиль.* Все исследованные разновозрастные почвы характеризовались достаточно высокой карбонатностью. В течение исторического времени наблюдалась динамика содержания и профильного распределения CaCO<sub>3</sub>, глубины залегания и мощности аккумулятивного горизонта, пространственной дифференциации различных форм морфологических новообразований, их количества и размера. Наиболее интенсивно эти преобразования протекали в верхнем метровом слое. Глубина вскипания за последние 4000 лет не опускалась ниже 40 см. Верхняя граница горизонта аккумуляции карбонатов испытывала существенную динамику и перемещалась в пределах 40–83 см, максимально снижаясь в современных почвах и наиболее высоко поднимаясь к поверхности в средневековье и на рубеже веков. При этом скорость нисходящей миграции составляла 2–6 см/100 лет, восходящей – 4–10 см/100 лет. Общая мощность карбонатного горизонта колебалась от 80 до 110 см. Исследованные почвы характеризовались присутствием двух форм карбонатных новообразований в почвенной толще: миграционных – псевдомицелий и сегрегационных – белоглазка. Детальный анализ размера и распределения белоглазки в почвах, погребенных в начале и конце I в. н. э., выявил следующую закономерность: в течение исследованного хроносреза шло укрупнение размеров и уменьшение количества белоглазки, возрастала мощность карбонатного горизонта, обусловленная увеличением увлажненности территории [7]. Выявленные закономерности согласуются с результатами исследований современных черноземов [8]. Установлено, что различия в гидротермических условиях черноземов обуславливают формирование карбонатных аккумуляций в порах разного размера. В черноземах лесостепи выделения кальцита сосредоточены в основном в крупных и средних порах, в степных – в мелких. При-

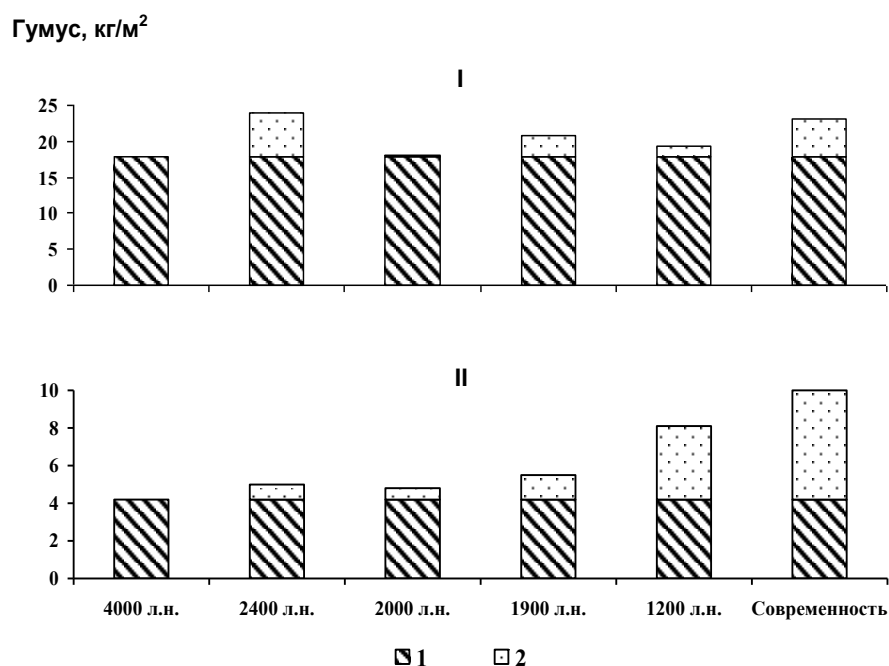
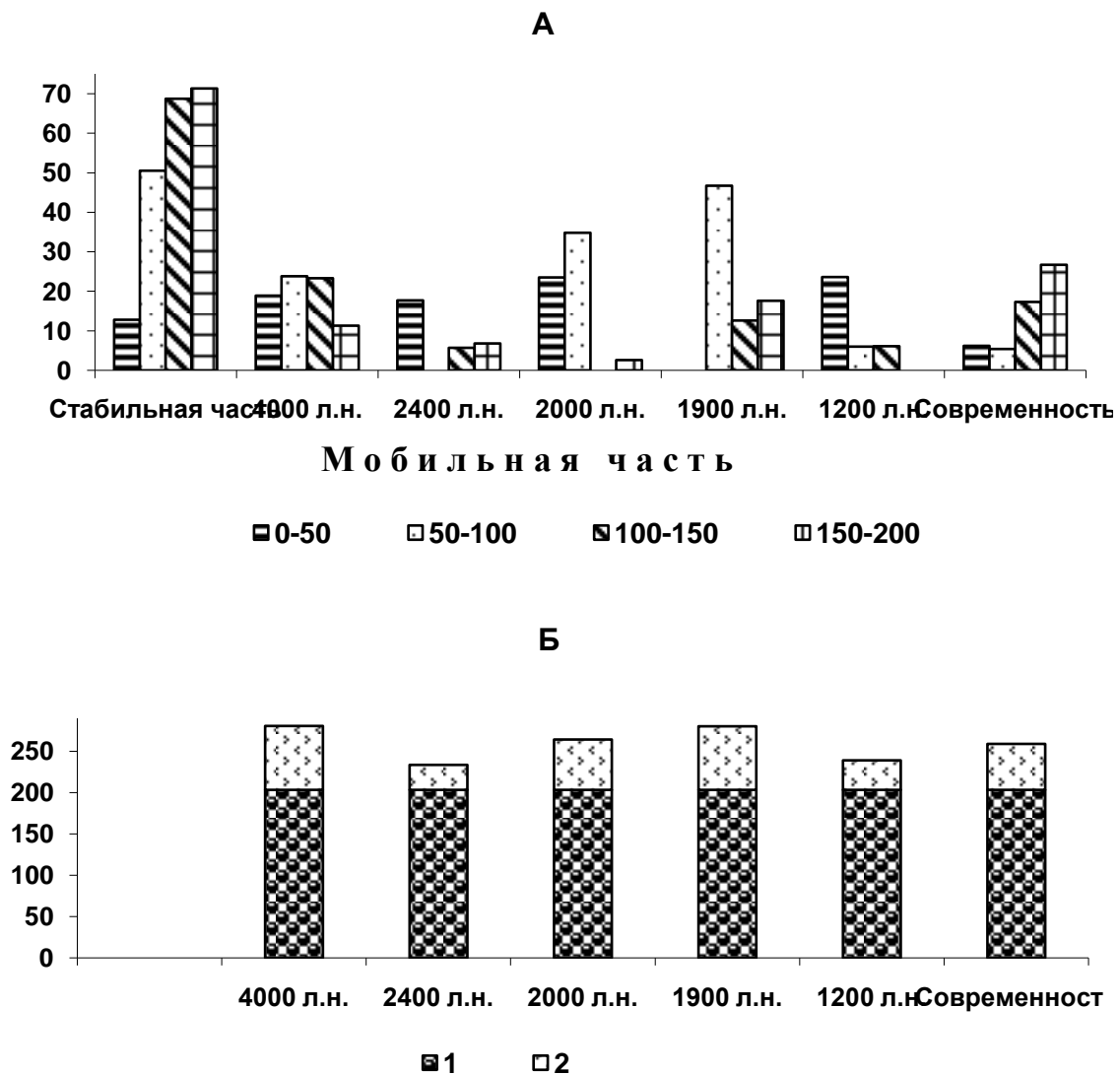


Рис. 1. Динамика запасов гумуса в различных слоях метровой толщи черноземов: 1 – запасы гумуса, сформированные к рубежу III–II тыс. до н. э.; 2 – запасы гумуса, формировавшиеся в течение последних 4000 лет в слоях 0–50 см (I); 50–100 см (II)

$\text{CaCO}_3$ , кг/м<sup>2</sup>

**Рис. 2.** Динамика стабильной (1) и мобильной (2) составляющей запасов карбонатов в двух метровой толще черноземов Нижнего Дона: А – в слоях 0–50 см, 50–100 см, 100–150 см, 150–200 см; Б – в слое 0–200 см

уроченность основных выделений кальцита в черноземах лесостепи к крупным порам определяется капиллярным переносом влаги. В степных черноземах в связи с более напряженными гидротермическими условиями возрастает возможность пленочного переноса влаги и внутрипочвенного испарения, что приводит к аккумуляции кальцита преимущественно в мелких порах. Динамика запасов  $\text{CaCO}_3$  имела следующую направленность: в интервале времени 4000–2400 лет назад запасы карбонатов в 2-метровой толще сократились на 450 т/га, или на 16 %, а в последующие 400 лет возросли на 250 т/га, или на 9 %, а к концу I в. н. э. достигли первоначального уровня (рис. 2). Последующие 700 лет вновь характеризовались потерей запасов на 450 т/га, с VIII в. н. э. до настоящего времени запасы карбонатов практически восстановились вновь.

Около 70 % общих запасов карбонатов в 2-метровой толще на протяжении последних 4 тыс. лет практически не изменялись и представляли собой пассивную

(реликтовую), унаследованную от почвообразующей породы часть. При этом отмечается дифференциация в распределении стабильной составляющей в почвенном профиле: в верхнем полуметре она составляет 6 % от общего стабильного запаса, во втором полуметре – четверть и две трети расположены во втором метре. И лишь 1/3 часть карбонатов была динамичной, активно трансформировалась в почвенной толще. Исследования карбонатного профиля современных черноземов [9–10] подтверждают существование двух групп карбонатов: инертной части, относительно прочно закрепленной в минеральной части почв и не преобразующейся в процессе почвообразования. Количество ее определяется литологией почвообразующих пород и биоклиматическими условиями, при которых происходило образование пород и почв. Другая часть – педогенно-мобилизованная – вовлечена процессами педогенеза в миграцию и закономерно, в соответствии с гидротермическими режимами, перераспределяется в

профиле черноземов. Именно эта группа определяет специфику карбонатных профилей подтиповых черноземных формаций.

Перейдем к анализу динамики углеродного резервуара двухметровой толщи черноземов Приазовья. На протяжении исторического времени общие запасы углерода (Сорг + Скарб.) в двухметровой толще (рис. 3) оставались стабильными и составляли 47–48 кг С/м<sup>2</sup>.

При этом 30–40 % запасов было представлено углеродом гумуса, 60–70 % – карбонатным углеродом. Климатические колебания существенно влияли на их соотношения. В аридные эпохи количество Скарб. достигало 34 кг/м<sup>2</sup>, в гумидные – не превышало 28 кг/м<sup>2</sup>. При этом запасы карбонатного углерода в 3 раза превышали запасы органического в аридные эпохи, в гумидные – в 1,5 раза. Эмиссия CO<sub>2</sub> из карбонатного пула могла составлять 6 кгС/м<sup>2</sup>.

Максимальные запасы органического углерода, составляющие 19 кг/м<sup>2</sup>, формировались в гумидные эпохи, в то время как аридизация климата обуславливала их сокращение до 12–14 кг/м<sup>2</sup>. При этом масштаб возможной эмиссии диоксида углерода из гумусового пула не превышал 5–7 кгС/м<sup>2</sup>.

Установлена тенденция обратной зависимости в накоплении различных форм углерода: уменьшение запасов углерода гумуса, отмеченное в XVII в. до н. э. и на рубеже эр, сопровождалось увеличением запасов карбонатного углерода. В IV в. до н. э. накопление углерода гумуса происходило на фоне снижения аккумуляции его карбонатных форм.

Анализ распределения запасов углерода по глубинам 2-метровой почвенной толщи с интервалом 50 см выявил наибольшую динамичность углеродного резервуара верхнего метрового слоя (рис. 4, 5).

Изменчивость в верхнем полуметре определялась накоплением углерода гумуса и характеризовалась цикличностью. В этой толще сосредоточено от четверти до трети запасов педогенного углерода, что составляет 12–18 кг/м<sup>2</sup>, при этом запасы углерода гумуса в 2–4 раза превышают запасы карбонатного углерода и представляют 55–80 % его общего запаса в почвенном профиле.

Тренд динамики углеродного резервуара нижней полуметровой толщи определялся аккумуляцией карбонатного углерода и также характеризовался цикличностью. В то же время шел поступательный процесс депонирования органического углерода, составивший более 3 кгС/м<sup>2</sup> за последние 4000 лет. Емкость углеродного резервуара варьировала от 10 до 15 кгС/м<sup>2</sup> и составляла от 20 до 30 % от его общей величины в 2-метровой толще. При этом доля запасов углерода гумуса колебалась от 20 до 50 %, карбонатного углерода – 50–80 % его общего запаса в почвенном профиле.

Для некоторых хроносрезов определены скорости трансформации запасов педогенного углерода. В XX–XVII вв. до н. э. сокращение запасов углерода в верхнем полуметре составило 0,4 кг/м<sup>2</sup> за 100 лет, в I в. до н. э. – I в. н. э. скорость аккумуляции его запасов в этой же толще достигала 1 кг/м<sup>2</sup> за 100 лет. В нижнем полуметре (50–100 см) скорость накопления карбонатного углерода в эти же временные рамки (срезы) варьировала от 0,5 кг/м<sup>2</sup> за 100 лет до 2,3 кг/м<sup>2</sup> за 100 лет соответственно.

Около половины запасов педогенного углерода было сосредоточено в верхней метровой толще. Его количество варьировало в пределах 23–27 кг/м<sup>2</sup>, при этом

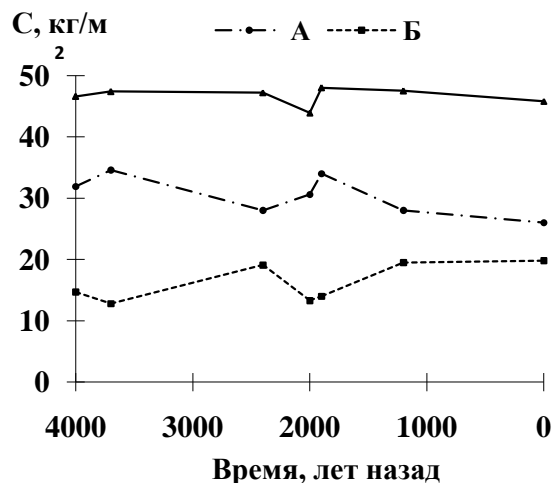


Рис. 3. Динамика запасов углерода в толще 0–200 см за последние 40 вв.: А – запасы углерода карбонатов, Б – запасы углерода гумуса, В – общий запас педогенного углерода

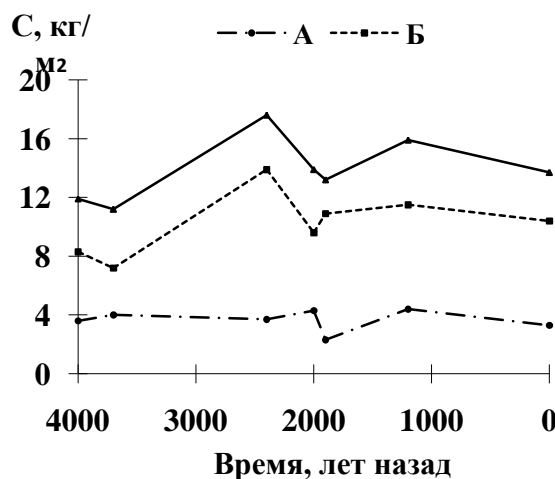


Рис. 4. Динамика запасов углерода в толще 0–50 см за последние 40 вв.: А – запасы углерода карбонатов, Б – запасы углерода гумуса, В – общий запас педогенного углерода

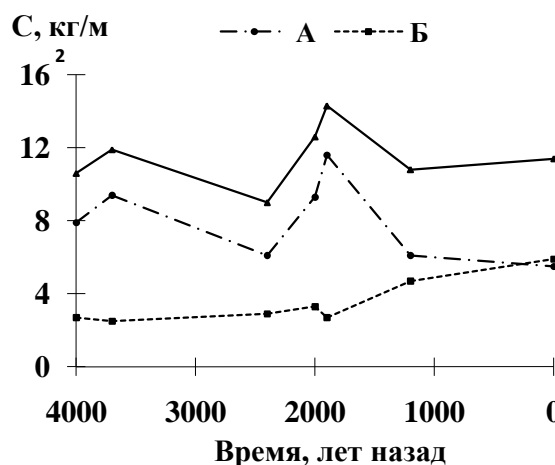


Рис. 5. Динамика запасов углерода в толще 50–100 см за последние 40 вв.: А – запасы углерода карбонатов, Б – запасы углерода гумуса, В – общий запас педогенного углерода

запасы углерода гумуса составляли 50–60 %, углерода карбонатов – 40–50 %.

В полуметровой толще размещено 75–80 % педогенного углерода, что составляло 35–39 кгС/м<sup>2</sup>. В его составе 35–50 % углерода гумуса и 50–65 % углерода карбонатов.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Общая емкость углеродного резервуара черноземов Приазовья на протяжении последних 4000 лет составляла около 50 кгС/м<sup>2</sup>, что соответствует среднестатистическим данным общей массе педогенного углерода в современных черноземах [11]. Основные ее компоненты находились в состоянии динамического равновесия.

2. Позднеголоценовые климатические изменения не оказывали существенного влияния на общую емкость углеродного резервуара, в то же время являлись триггерным механизмом процессов эмиссии-стока диоксида углерода отдельных ее составляющих (Сорг и Скарб.).

3. Амплитуда варьирования величин депонирования органического углерода, обусловленная динамикой увлажнения климата, составляла 12–19 кг/м<sup>2</sup>; карбонатного – 28–34 кг/м<sup>2</sup>. Мобильная составляющая углеродного резервуара не превышала 1/3 и характеризовала масштабы вероятной эмиссии-стока диоксида углерода.

4. Скорости трансформации запасов углерода изменялись в пределах от +0,4 до 2,3 кгС/м<sup>2</sup> за 100 лет.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Углерод и живое вещество в земной коре // Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 147-223.
2. Глазовская М.А. Педолитогенез и континентальные циклы углерода. М.: Изд-во «Книжный дом ЛИБРОКОМ», 2009. 336 с.
3. Добровольский Г.В., Трофимов С.Я., Седов С.Н. Углерод в почвах и ландшафтах Северной Евразии // Круговорот углерода на территории России. М., 1999. С. 233-270.
4. Демкин В.А. Палеопочвоведение и археология. Пушкино, 1997. 214 с.
5. Дергачева М.И. Археологическое почвоведение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Науч.-издат. центр ОИГТМ, 1997. 228 с.
6. Pesochina L.S. The regularities of the Late Holocene soil formation in the Lower Don steppes // Eurasian Soil Science. 2010. V. 43. № 13. P. 1547-1556.
7. Песочина Л.С., Гольева А.А., Зайцев С.В. Изменчивость почв и природных условий северо-восточного Приазовья в среднесарматское время // Почвоведение. 2000. № 6. С. 683-691.
8. Лебедева И.И. Основные компоненты морфологического профиля черноземов // Русский чернозем. 100 лет после Докучаева. М.: Наука, 1983. С. 103-117.
9. Лебедева И.И., Овечкин С.В. Активные и инертные карбонаты и их баланс в черноземах левобережной Украины // Тез. докл. V съезда ВОП. Минск, 1977. С. 112-114.
10. Лебедева И.И., Овечкин С.В. Карбонатный профиль восточно-европейских черноземов // Почвоведение: аспекты, проблемы, решения. Научные труды почвенного института им. В.В. Докучаева. М., 2003. С. 34-54.
11. Глазовская М.А. Роль и функция педосферы в геохимических циклах углерода // Почвоведение. 1996. № 2. С. 174-186.

Поступила в редакцию 25 сентября 2012 г.

### Pesochina L.S. LATE HOLOCENE DYNAMICS OF THE BIOGEOCHEMICAL CARBON CYCLE IN THE STEPPE LANDSCAPES OF THE SOUTH OF THE RUSSIAN PLAIN

Scales, trends and speeds of carbon reservoir changes in Chernozem as well as in its main components (humus and carbonates) in various soil layers were estimated for the first time for the Late Holocene based on the comparative analysis of paleosols buried in different archaeological ages in the south of Russian Plain

*Key words:* biogeochemical carbon cycle; pedo-chronosequence; Holocene; chernozems.