

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ  
ПЛЕЙСТОЦЕНА НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ЛЁССОВО-  
ПОЧВЕННОГО КОМПЛЕКСА «СЕМИБАЛКИ-2» (ПРИАЗОВЬЕ)**

**П. И. Калинин, А. О. Алексеев, И. Ю. Кудреватых, И. М. Вагапов**

*Институт Физико-Химических и Биологических Проблем Почвоведения РАН*

Поступила в редакцию 16 марта 2016 г.

**Аннотация:** в статье рассмотрена возможность комплексного применения магнитных и геохимических показателей для количественных реконструкций климата плейстоцена на примере отложений лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2», расположенного на южном побережье Таганрогского залива. Показано, что на территории Приазовья в плейстоцене существовал направленный сдвиг гидротермического режима межледниковых эпох от условий с высокой влагообеспеченностью к условиям роста аридизации.

**Ключевые слова:** плейстоцен, лёссово-почвенные комплексы, магнитная восприимчивость, палеоклиматические реконструкции, атмосферные осадки.

**QUANTITATIVE RECONSTRUCTION OF PLEISTOCENE CLIMATE BASED ON THE INVESTIGATION OF LOESS-SOIL COMPLEXE "SEMIBALKI-2" (AZOV SEA AREA)**

**Abstract:** the article shows the possibility of complex application of magnetic and geochemical indicators for quantitative reconstructions of Pleistocene climate on the example of loess-soil complex "Sembalki-2", located on the southern coast of the Taganrog Gulf. It was revealed that in the Pleistocene shift hydrothermal regime of interglacial epochs in area of the Azov Sea changed from a highly humid conditions to the magnification of aridity.

**Keywords:** pleistocene, loess-soil complexes, magnetic susceptibility, paleoclimate reconstruction, precipitation.

**Введение**

Лёссово-почвенные комплексы являются уникальным наземным хранилищем палеоклиматических флуктуаций глобального и регионального масштаба, которые обеспечивают понимание эволюции четвертичного периода и глобальных климатических изменений [1–6]. Тем не менее, целостность, точность и поиск палеогеографической информации зависит от степени развития и сохранения диагностических свойств в исследуемом объекте и возможности эти свойства интерпретировать с помощью современных методов исследования.

По определению лёссово-почвенные комплексы представляют собой зонально-климатическое образование преимущественно плейстоценового возраста, возникшее в условиях чередования перигляциальных и субтропических условий [7]. Изменения гидротермических условий в течение четвертичного периода находило свое отражение в соотношении интенсивности процессов седиментации и почвообразования, что влияло на минералогический, химический состав и магнитное состояние лёссовых отложений. Много-

численные исследования показали, что характер профильного распределения показателя магнитной восприимчивости в погребённых почвах позволяет судить об условиях, в которых происходила их формирование [8–10]. В частности, разработан новый подход для реконструкции количества атмосферных осадков в разные исторические эпохи по результатам изучения магнитной минералогии палеопочв степей в голоцене и плейстоцене [8, 11, 12]. Анализ данных для различных регионов планеты и математическое моделирование данных, проведенное Maher B. с соавторами [11, 12] показали, что наибольшая статистическая зависимость между магнитными свойствами почв и среднегодовым количеством осадков фиксируется в степной зоне Русской равнины и для территории лёссового плато Китая в интервале осадков 300–700 мм/год.

Перспективными методами в палеоклиматических реконструкциях являются исследования геохимических параметров в четвертичных отложениях [13]. В многочисленных исследованиях была выявлена корреляция между записями стабильного изотопа кисло-

рода в ледовых кернах с различными геохимическими параметрами (соотношения Rb/Sr, Ba/Sr, величина магнитной восприимчивости и др.) в лёссово-почвенных комплексах [5, 14]. Для палеопочв юга Русской равнины установлена зависимость изменения концентраций Rb в гумусо-аккумулятивных горизонтах разновозрастных голоценовых и плейстоценовых почв со среднегодовым количеством атмосферных осадков [13, 14]. Направленное изменение минералогического и химического состава лёссовых отложений под воздействием климатических изменений дает возможность использовать различные геохимические параметры для количественных реконструкций динамики окружающей среды плейстоцена. Так наибольшие значения коэффициентов засоления и карбонатности ((CaO + MgO)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O, (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) отмечаются в лёссовых горизонтах, что говорит о более сухих условиях, существовавших в ледниковые эпохи. В противоположность им коэффициенты выветривания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+MgO), Rb/Sr и Ba/Sr, окисления и биологической активности ((Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MnO)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) показывают максимальные значения в почвенных комплексах, что говорит о том, что эти отложения подвергались наиболее интенсивному преобразованию в межледниковые периоды [13].

Целью данного исследования является комплексное применение магнитных и геохимических показателей для количественных реконструкций климата плейстоцена на примере отложений лёссово-почвенных комплексов южного побережья Таганрогского залива.

#### Методика эксперимента

Объектом исследования был опорный разрез «Семибалки-2», содержащий горизонты лёссов и ископаемых почв плейстоценового возраста. Лёссово-почвенный комплекс расположен на территории Азово-Кубанской низменности на южном побережье Таганрогского залива примерно в 30 км к западу от г. Азова. Большую часть территории занимают лёссовые аккумулятивно-эрозионные равнины [15]. Береговой обрыв здесь вскрывает участок террасовой поверхности высотой 35 м. Мощностъ изученного разреза составляла 15 м.

Северо-Восточное Приазовье, ввиду полноты и открытости разрезов четвертичных отложений, является одним из наиболее значимых в палеогеографическом отношении районов юга Русской равнины. Береговые обнажения Таганрогского залива позволяют непрерывно проследить строение лёссово-почвенных комплексов на протяжении многих километров [2]. В разрезе «Семибалки-2» представлены три региональных комплекса ископаемых почв (снизу вверх): воронский, инжавинский, каменский – и четыре горизонта лёссов: коростылевский, борисоглебский, валдайский.

Корреляция горизонтов почв проводилась в предшествующих исследованиях на основе данных о воз-

расте подстилающих лиманных отложений и сопоставлении генетических свойств по палеопедологическим данным с другими районами Русской равнины [16]. За основу была взята хроностратиграфическая схема плейстоцена, разработанная лабораторией Эволюционной географии ИГ РАН [7].

Разрез нижнего плейстоцена лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2» представлен воронским почвенным комплексом, сформированном в мучкапское межледниковье и залегающим на глубине 7,65–9,55 м, сложенным мелкопористым суглинком, переходящим в нижней части слоя в тяжелый, мощностью 2,1 м. По описанию А. А. Величко и Т. Д. Морозовой [7, 16] воронский почвенный комплекс соответствует современным почвам, развитым в условиях субтропического климата (коричневые или переходные к ним подтипы).

Средним плейстоценом датируется часть разреза, в котором выделяются два педокомплекса и два лёссовых горизонта. Инжавинский педокомплекс, сформированный в лихвинское межледниковье, залегают на глубине 5,4–7,35 м и представляет собой мощную почву со столбчатыми отдельностями. Она характеризуется сложно построенным гумусовым горизонтом, подразделяющимся на несколько слоев по степени окрашенности отдельностей. Почва сложена преимущественно темно-коричневым суглинком. Инжавинская почва определена как черноземовидная прерий (файозем, брүнизем).

Каменский педокомплекс, сформированный в каменское межледниковье, залегают на глубине 2,6–4,1 м и состоит из темно-коричневого суглинка, переходящего в горизонте в коричневый, более светлый суглинок. Каменский почвенный комплекс аналогичен современным бурым и коричневым почвам.

К верхнему плейстоцену в районе относятся отложения валдайского горизонта лёссов. Он располагается на глубине 1,5–2,5 м и сложен светло-коричневым суглинком. Выше залегают современная почва, представляющая черноземом обыкновенным.

*Геохимические коэффициенты.* В связи с тем, что с помощью различных геохимических параметров можно проводить как количественные климатические реконструкции (палеосадки, палеотемпературы), так и определять интенсивность процессов осадконакопления и почвообразования (выветривания, выщелачивания, засоления, биопродуктивности растений и т.д.) для целей исследования использовались следующие геохимические коэффициенты:

1) Коэффициенты выветривания:

- CIA=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO\*+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]100 (Ca бескарбонатный). Отражает соотношение первичных и вторичных минералов в валовом образце. Может быть использован как климатический показатель [17];

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O+MgO). Представляет отношение Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (глинистая составляющая), к основным катионам, выносимым в почвенные растворы [18];

- Rb/Sr. Коэффициент предложен как разница в устойчивости различных минералов к выветриванию,

а именно слюд и калиевых полевых шпатов, с которыми в ассоциации находится Rb, и карбонатов, с которыми ассоциирует Sr [19];

2) Ba/Sr. Характеризует гидротермические условия осадконакопления, в частности, процесс выщелачивания [18]. Ba находится в ассоциации с калиевым полевым шпатом и выносится из почв слабее Sr, который ассоциирует с карбонатами [20];

3)  $(Fe_2O_3 + MnO)/Al_2O_3$ . Характеризует интенсивность окисления почвенного материала [18];

4)  $MnO/Fe_2O_3$ ,  $Mn_2O/Al_2O_3$ . Позволяют судить об уровне биологической активности и биопродуктивности [14];

5)  $(CaO + MgO)/Al_2O_3$ . Отражает накопление кальцита и доломита [18];

6)  $Na_2O/K_2O$ ,  $(K_2O + Na_2O)/Al_2O_3$ ,  $Na_2O/Al_2O_3$ . Характеризуют поведение легкорастворимых солей в породах и почвах [18].

Зависимость геохимических показателей в различных отложениях от современного уровня атмосферных осадков описываются уравнениями:

$$1. MAP1 = 221.1e^{0,0179(CIA-K)} [21]$$

$$2. MAP2 = -259.3 \ln(\sum Bases/Al) + 759 [21]$$

Связь между изменением концентрации Rb в гумусовых горизонтах погребенных почв сухостепной зоны, относительно фоновых значений, характерных для пород данного региона с реконструированным уровнем атмосферных осадков, отражает формула:

$$3. Y_{Rb} = 91,305x + 302,86 [14]$$

Взаимосвязь прироста магнитной восприимчивости со среднегодовым количеством атмосферных осадков (на примере данных лёссовых отложений Китайского лёссового плато) описывается уравнением:

$$1. MS1\_MAP = 222 + 199 \log(Xb - Xc) [11]$$

Подобная взаимосвязь установлена также для почв и лёссов степной и сухостепной зоны Русской равнины:

$$2. MS2\_MAP = 86,4 \ln(Xb - Xc) + 90,1 [22]$$

В данном исследовании измерения концентраций макро- и микроэлементов в породах и почвах осуществлялись на рентгеновском аппарате «СПЕКТРОСКАН МАКС – GV» по методике измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах рентгенфлуоресцентным анализом. Средняя проба измельчалась до пудры и помещалась в специальную кювету. Стандартная навеска была не менее 200 мг. Для измерения навесок массой менее 200 г применялись специальные калибровки и технология изготовления образцов с борной кислотой.

Измерения показателя магнитной восприимчивости проводились в лабораторных условиях на приборе «KAPPABRIDGE KLY-2».

### Результаты и обсуждения

Лёссово-почвенный комплекс «Семибалки-2» характеризуется сравнительно однородным гранулометрическим составом, за исключением нижней части разреза, которая сложена глинами. Содержание гли-

нистой фракции (<0,001 мм) варьирует от 20,3 % (глубина 9,05 м) до 48,3 % (глубина 6,35 м), пылеватой (0,05-0,001 мм) – от 21,2 % (глубина 9,05 м) до 72,4 % (глубина 0,4 м), песчаной (> 0,05 мм) – от 0,1 % (глубина 5,85 м) до 58,5 % (глубина 9,05 м).

В почвенных горизонтах фиксируется некоторое увеличение содержания глинистой фракции (<0,001 мм), от 41,2 % (глубина 2,6 м) до 48,3 % (глубина 6,35 м). В лёссовых горизонтах, напротив, отмечается понижение значений до 20–30 % (глубина 2,5 м).

Средняя дисперсность глинистых компонентов для лёссов и почв одинакова и составляет 0,23–0,24 %, что является типичным значением для лёссовых пород и характеризует глинистые компоненты, слагающие разрез, как тонкоиловые.

Химический состав почв и лёссов разреза «Семибалки-2» демонстрирует преобладание в составе элементов Si, Al, Ca, Fe, K и Mg (табл. 1). Большинство элементов не превышают кларковых концентраций, характерных для осадочных пород. Исключения составляют Ca, Na, Mg и As, элементы, связанные с карбонатами и легкорастворимыми солями, которые широко распространены в лёссовых отложениях этого региона. В почвенных комплексах содержание Si, Al, Fe и K выше, чем в горизонтах лёссов, в которых фиксируется повышенное содержание Ca, Mg и Na, ассоциирующих с карбонатами и легкорастворимыми солями (табл. 1).

Таблица 1  
Химический состав почв и лёссов  
разреза «Семибалки-2»

Элемент, %	Почва	Лёсс
	интервал / среднее значение	
Na	0,79–1,71/1,06	0,91–1,54/1,22
Mg	0,87–1,89/1,23	1,19–1,74/1,45
Al	5,16–6,33/5,76	5,28–5,77/5,58
Si	22,33–28,86/26,69	23,66–26,82/25,52
P	0–0,31/0,12	0–0,16/0,08
S	0–0,42/0,05	0–0,01/0,006
K	1,31–1,62/1,49	1,33–1,64/1,46
Ca	2,81–8,77/4,92	4,47–8,05/6,15
Ti	0,12–0,30/0,22	0,15–0,28/0,24
V	0,001–0,006/0,004	0,002–0,005/0,004
Cr	0,009–0,011/0,01	0,009–0,01/0,009
Mn	0,04–0,10/0,05	0,04–0,06/0,052
Fe	2,51–3,45/3,01	2,57–3,11/2,87
Ni	0,005–0,007/0,006	0,006–0,007/0,006
Cu	0,005–0,007/0,006	0,006–0,007/0,006
Zn	0,006–0,008/0,007	0,006–0,007/0,007
As	0,001–0,0011/0,001	0,001–0,0011/0,001
Rb	0,006–0,012/0,008	0,006–0,008/0,007
Sr	0,015–0,027/0,022	0,022–0,026/0,024
Ba	0,039–0,043/0,041	0,040–0,045/0,041
Pb	0,002–0,003/0,003	0,003–0,0031/0,003

Отмечается аккумуляция в почвах ряда тяжелых металлов (Cr, Zn), а также P, Mn, Fe и Rb, накапливающихся за счет увеличения атмосферной увлажненности и связанной с этим активизацией процессов выветривания и почвообразования, а также увеличения интенсивности биологической активности в периоды межледниковий.

По показателю CIA породы, слагающие разрез «Семибалки-2», являются слабовыветрелыми [23]. Среднее значение CIA в лёссовых горизонтах составляет 51, в почвенных комплексах 64. Используя данный показатель для разграничения, в исследуемой лёссово-почвенной толще можно выделить 3 группы отложений: первая из них характеризуется значениями коэффициента  $CIA \geq 70$ , вторая  $CIA \leq 50$ , третья  $50 \leq CIA < 70$  (рис. 1).

Показателем CIA порядка 70 характеризуются отложения, находящиеся на границе слоя 13 и 14 на глубине – 8,45–8,75 м. Слой 13 сложен буровато-коричневым суглинком со слабым красноватым оттенком, а переходный слой 14 представлен пестроокрашенным суглинком с комковатой структурой. Эти слои соответствуют воронскому педокомплексу, сформированному в мучкапское межледниковье. Для этих отложений отмечается повышение значений показателей выветривания и выщелачивания ( $CIA \sim 67-70$ ,  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O+MgO) \sim 0,4$ ,  $Rb/Sr \sim 0,4-0,5$ ,

и  $Ba/Sr \sim 1,7-2,1$ ), а также максимальные значения коэффициентов окисления почвенного материала, биологической активности и биопродуктивности,  $(Fe_2O_3+MnO)/Al_2O_3 \sim 0,3$ ,  $MnO/Fe_2O_3 \sim 0,07-0,1$ ,  $MnO/Al_2O_3 \sim 0,02-0,03$ ) (рис. 2).

Следующим слоем, для которого отмечается некоторое увеличение значений коэффициентов выветривания, является слой 10 (глубина 6,1 м). Этот слой сложен темно-коричневым суглинком и, вероятно, соответствует инжавинской почве, сформированной в лихвинское межледниковье. Наблюдается увеличение показателя CIA до 73, что соответствует достаточно выветрелым отложениям, сформировавшимся в условиях относительно влажного и теплого климата, а также коэффициентов выветривания  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O+MgO) \sim 0,5$ ,  $Rb/Sr \sim 0,4$  и концентрации Rb  $\sim 92$  мг/кг. Отмечается и увеличение значений показателей окисления  $(Fe_2O_3+MnO)/Al_2O_3 \sim 0,3$ , биологической активности и биопродуктивности  $MnO/Fe_2O_3 \sim 0,07$ ,  $Mn_2O/Al_2O_3 \sim 0,02$  (см. рис. 1,2).

Некоторым увеличением коэффициента CIA (порядка 62–66) характеризуются слои 6 и 7, залегающие на глубине 2,6–3,6 м. Они сложены темно-коричневым суглинком и являются сформированной в чекалинское межледниковье каменной почвой.

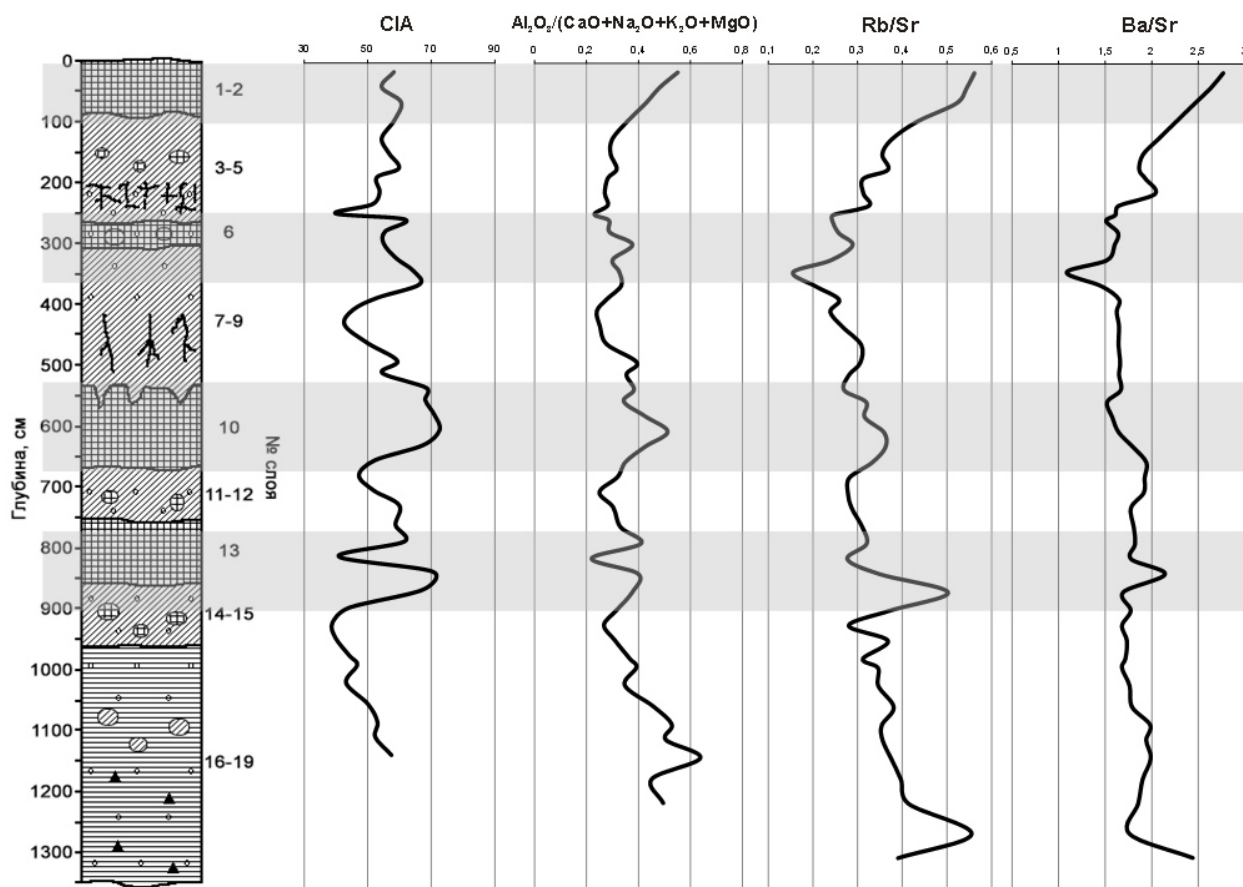


Рис. 1. Распределение значений коэффициентов выветривания и выщелачивания в отложениях лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2».

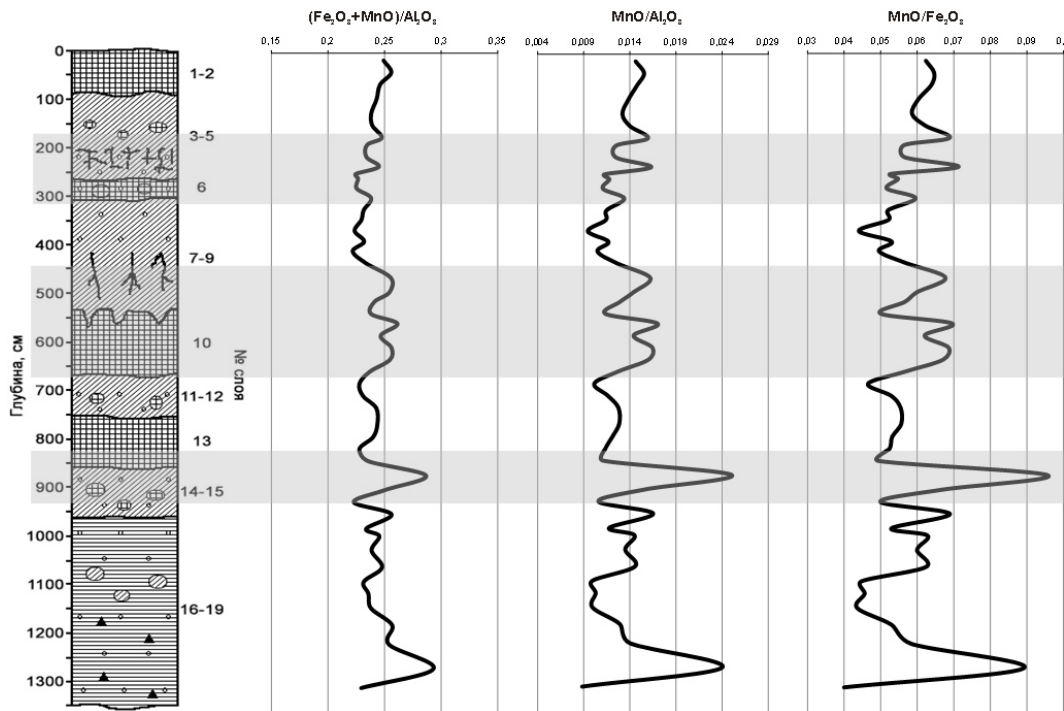


Рис. 2. Распределение значений коэффициентов окисления и биологической активности в отложениях лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2».

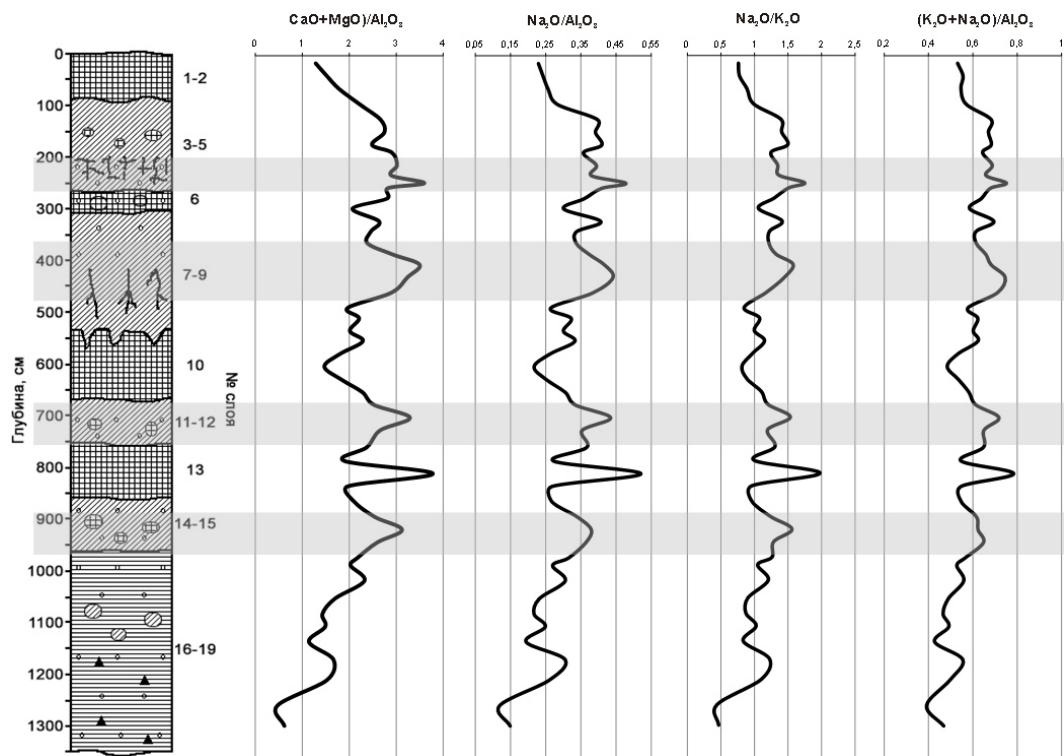


Рис.3. Распределение значений коэффициентов засоления и карбонатности в отложениях лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2».

Значениями коэффициента  $CIA \leq 50$  характеризуются отложения слоев 15 ( $CIA=39$ ), залегающих на глубине 9,3 м. Такие низкие значения данного показателя связаны, прежде всего, с тем, что отложениями этих слоев является карбонатный горизонт В воронковой почвы, сложенной светло-коричневым светлым суглинком. Для

этого слоя характерны пониженные значения коэффициентов выветривания  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O+MgO) \sim 0,3$ ,  $Rb/Sr \sim 0,3$  и  $Ba/Sr \sim 1,7$ . Значения коэффициентов карбонатности и засоления, напротив, показывают высокие значения:  $(CaO+MgO)/Al_2O_3 \sim 3,1$ ,  $Na_2O/K_2O \sim 1,6$ ,  $(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3 \sim 0,6$ ,  $Na_2O/Al_2O_3 \sim 0,4$  (рис. 3).

Низкие значения показателя CIA=47 фиксируются в сложенном серо-коричневым суглинком слое 11, расположенном на глубине 6,85–7,1 и представляющим собой отложения коростылевского лёсса. Для него характерно резкое увеличение значений коэффициентов карбонатности и засоления:  $(CaO+MgO)/Al_2O_3 \sim 3,3$ ,  $Na_2O/K_2O \sim 1,5$ ,  $(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3 \sim 0,7$ ,  $Na_2O/Al_2O_3 \sim 0,4$ . Значения коэффициентов выветривания:  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O+MgO) \sim 0,2$ ,  $Rb/Sr \sim 0,3$  и  $Ba/Sr \sim 1,8$ .

Выше по разрезу на глубине 4,4 м залегает слой 9, сложенный коричнево-палевым суглинком, для которого характерно значение показателя CIA порядка 43, что является характерным для слабовыветренных пород. Этот слой относится к отложениям борисоглебского лёсса. Он характеризуется высокими значениями коэффициентов карбонатности и засоления:  $(CaO + MgO)/Al_2O_3 \sim 3,5$ ,  $Na_2O/K_2O \sim 1,6$ ,  $(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3 \sim 0,7$ ,  $Na_2O/Al_2O_3 \sim 0,4$ .

В нижней части слоя 5, залегающего на глубине 2,5 м и сложенного плотным коричневым суглинком, отмечается значение коэффициента CIA порядка 40. Эти отложения диагностируются как валдайский лёсс (валдайское оледенение). Они характеризуются высокими значениями коэффициентов карбонатности и засоления:  $(CaO + MgO)/Al_2O_3 \sim 3,6$ ,  $Na_2O/K_2O \sim 1,7$ ,  $(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3 \sim 0,8$ ,  $Na_2O/Al_2O_3 \sim 0,5$ .

Таким образом, отмечается уменьшение значений коэффициентов выветривания вверх по разрезу от более древних к более молодым отложениям. Коэффициенты карбонатности и засоления демонстрируют обратную тенденцию увеличения значений вверх по разрезу. Это говорит о том, что в течение плейстоцена на исследуемой территории снижалась интенсивность физического выветривания лёссовых отложений и увеличивалась степень их засоления и карбонатности. Такая тенденция подтверждает установленный с помощью морфотипических признаков почвенных комплексов направленный сдвиг гидротермического режима межледниковых эпох почвообразования от условий с более высокой теплообеспеченностью и влагообеспеченностью к условиям понижения теплообеспеченности и роста аридизации (Семибалки-1) [2]. На исследуемой территории в плейстоцене происходила последовательная смена межледниковых ландшафтов – от субтропических семигумидных к ландшафтам, близким к прериям, затем к бореальным теплоумеренным и далее к ландшафтам с почвами степного и лесостепного ряда в позднем плейстоцене.

### Реконструкции палеоосадков

Средние значения показателя удельной магнитной восприимчивости в лёссах разреза «Семибалки-2» составляет порядка  $32 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$ , в почвенных горизонтах порядка  $62 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$ . Это говорит о том, что условия почвообразования способствовали формированию ферримангнитных минералов. Максимальные значения фиксируются в воронской почве  $\sim 77 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$  и уменьшаются в почвенных горизонтах вверх

по разрезу:  $\sim 72 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$  в инжавинской,  $\sim 51 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$  в каменской почве.

Реконструированный по магнитным данным среднегодовой уровень атмосферных осадков, существовавший на протяжении формирования лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2» составлял в эпохи оледенений в среднем 290 мм/год по формуле (5) MS2 и 430 мм/год по формуле (4) MS1 (рис. 4). В более теплые и влажные периоды межледниковий, во время которых формировались почвенные комплексы, среднегодовой уровень атмосферных осадков увеличивался в среднем до 430 мм/год по формуле MS2 и до 560 мм/год по формуле MS1. Максимальные значения фиксируются в мучкапское межледниковье (450 и 580 мм/год) и последовательно снижаются в лихвинское (440 и 560 мм/год) и каменское (400 и 530 мм/год).

Значительная разница между показателями двух коэффициентов объясняется тем, что они были получены с помощью эмпирических зависимостей между современным уровнем атмосферных осадков и показателем магнитной восприимчивости в отложениях, состав и генезис которых отличается от лёссовых отложений Приазовья. Если взять за репер реконструированное значение количества атмосферных осадков по современной (голоценовой) почве, залегающей в верхней части разреза, то относительно этого показателя отмечается уменьшение уровня атмосферной увлажненности до 40 % в ледниковые периоды и увеличение до 5 % в межледниковые эпохи плейстоцена.

При вводе поправки на современный уровень атмосферной увлажненности в регионе (около 470 мм/год), показатели усредняются и демонстрируют значения порядка 500 мм/год для мучкапского межледниковья, 490 мм/год для лихвинского и 450 мм/год для каменского (см. рис. 4).

В целом, исходя из полученных значений, можно сказать, что по магнитным параметрам в течение плейстоцена сохраняется тренд на аридизацию.

Геохимические коэффициенты также демонстрируют увеличение значений в почвенных горизонтах. Распределения MAP1 и MAP2 близки: в эпохи оледенения средние значения этих показателей составляют 530 мм/год по формуле (1) MAP1 и 640 мм/год по формуле (2) MAP2, в межледниковые периоды порядка 1000 мм/год (MAP1) и 880 мм/год (MAP2) (рис. 5). В целом, эти показатели, по-видимому, завышают значения осадков, т.к. по морфотипическим признакам погребенных почв в среднем и позднем плейстоцене на исследуемой территории преобладали степные ландшафты, для формирования которых необходимы более низкие значения осадков.

Рассчитанное с помощью показателя  $Y_{Rb}$  по формуле (3) количество осадков значительно ниже. Средние значения для ледниковых эпох составляют около 320 мм/год, для межледниковых периодов - 390 мм/год. Максимальное значение фиксируется в мучкапское межледниковье  $\sim 440$  мм/год.

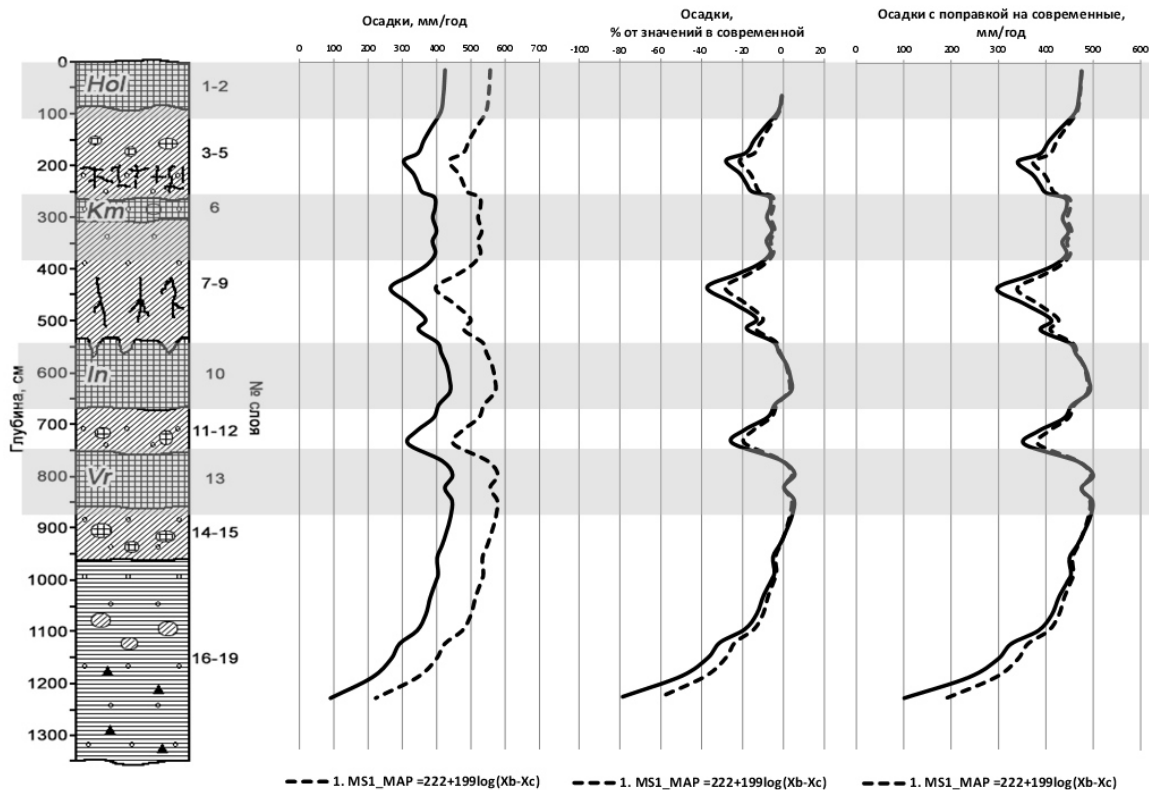


Рис. 4. Среднегодовой уровень атмосферных осадков на различных этапах исследуемого хроноинтервала, реконструированный с помощью показателя магнитной восприимчивости

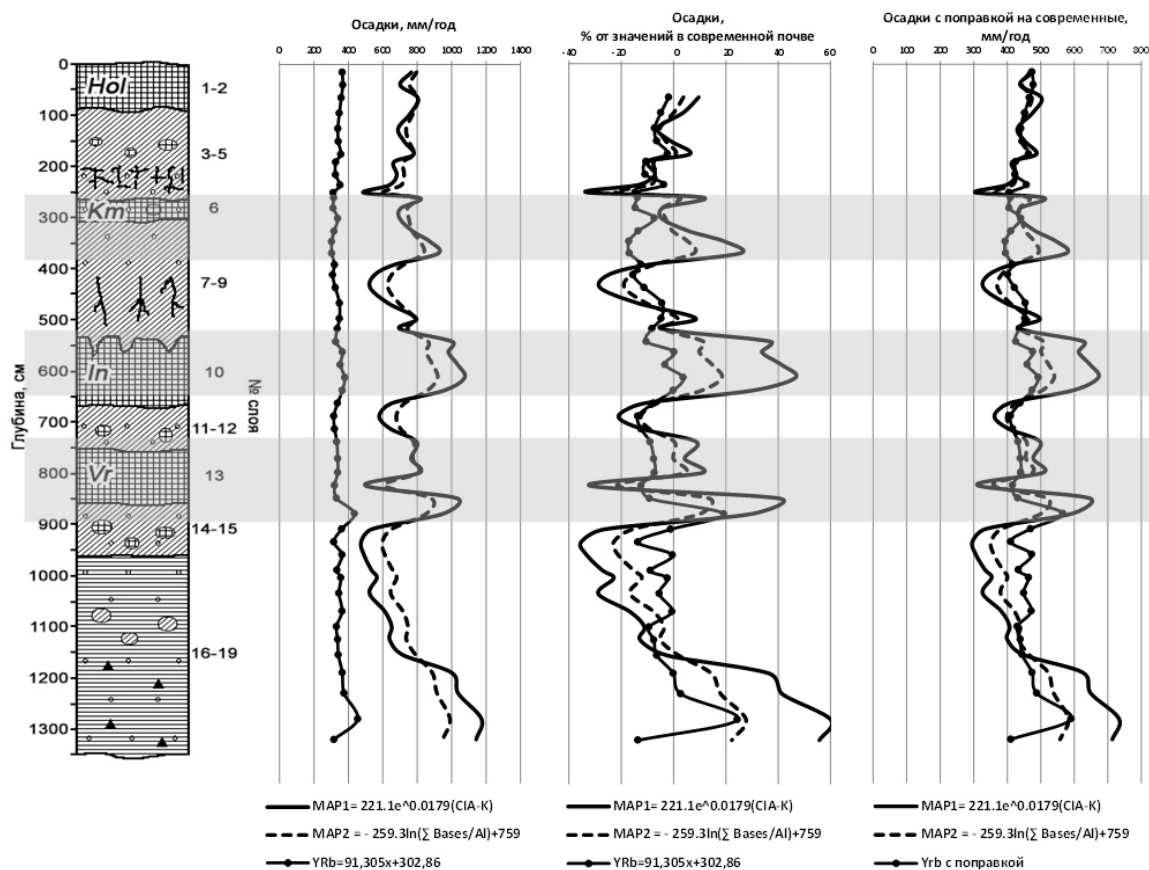


Рис. 5. Среднегодовой уровень атмосферных осадков на различных этапах исследуемого хроноинтервала, реконструированный с помощью геохимических параметров

Процентное отношение данных показателей от значений в современной почве показывает несколько иную картину. Показатели  $MAP_2$  и  $Y_{Rb}$  демонстрируют схожую тенденцию уменьшения от более древних эпох к более ранним. Увеличение количества осадков в межледниковые эпохи составляет порядка 20 %. В ледниковые эпохи уменьшение также доходит до 20%. Для показателя  $MAP_1$  эти значения имеют несколько больший градиент. На 50 % увеличивается количество атмосферных осадков в межледниковые периоды, на 30 % уменьшаются в эпохи оледенений (см. рис. 5).

При вводе поправки на современное количество осадков в регионе по показателям  $MAP_2$  и  $Y_{Rb}$  фиксируется тренд на аридизацию и уменьшение количества атмосферных осадков от 570–520 мм/год в мучкапское межледниковье до 440–490 мм/год в каменское. Эти значения сопоставимы с реконструкциями осадков в межледниковые эпохи по показателю магнитной восприимчивости. Более высокие значения показывает коэффициент  $MAP_1 \sim 580\text{--}670$  мм/год.

Таким образом, для межледниковых эпох плейстоцена были характерны более влажные, чем современные условия. В ледниковые периоды количество атмосферных осадков уменьшалось на 20–40 % относительно современных значений.

### Заключение

Основным принципом, лежащим в использовании геохимических, геофизических и др. показателей для реконструкции палеоклиматических условий древних эпох, является определение функциональной зависимости между этими параметрами в современных отложениях с современными климатическими условиями (среднегодовое количество осадков, температура и т. д.). Основной проблемой таких исследований является влияние на результат «матричного» эффекта, заключающегося в использовании эмпирических зависимостей, полученных для конкретных территорий и геологических отложений. Калибровка палеогеографических показателей, как правило, полученная для определенных климатических зон и соответствующих геологических пород не всегда позволяет однозначно реконструировать климатические особенности для всех исследуемых территорий и отложений. Формулы расчета реконструкций уровня атмосферных осадков, разработанные для отдельного региона, как правило, не работают для территории с существенно отличающимся гидротермическим режимом. Кроме того, геохимические коэффициенты, показывающие определенные тенденции в более древних отложениях, прошедших длительные стадии седиментогенеза, характеризующиеся высокой степенью химической дифференциации вещества, не демонстрируют какой-либо климатической специфики в более молодых четвертичных отложениях. Идеальное решение отмеченных проблем требует использование региональных калибровок, однако такие исследования для территории Русской равнины носят единичный характер. Не-

смотря на определенные объективные трудности, использование различных геохимических коэффициентов, наряду с петрофизическими и традиционными методами исследований четвертичных отложений, позволяет проводить реконструкцию условий их формирования.

Установлено, что более древние отложения лёссово-почвенного комплекса «Семибалки-2» характеризовались более высокой степенью преобразованности под воздействием процессов выветривания и почвообразования. В течение плейстоцена интенсивность этих процессов снижалась, содержание солей и карбонатов, напротив, возрастало. Это говорит о том, что на территории Приазовья в плейстоцене существовал направленный сдвиг гидротермического режима межледниковых эпох от условий с более высокой влагообеспеченностью к условиям роста аридизации. Наиболее гумидные условия на исследуемой территории существовали в период мучкапского межледниковья (500–600 мм/год), наиболее аридные в эпоху каменского межледнековья (400–500 мм/год). В ледниковые эпохи на территории Приазовья в среднем выпадало 300–400 мм осадков.

### Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность и искреннюю благодарность коллективу Лаборатории эволюционной географии Института географии РАН за предоставленный научный материал и ценные консультации. Отдельно хотелось бы выразить благодарность главному инициатору и постоянному участнику экспедиций в Приазовье д.г.н., профессору **Андрею Алексеевичу Величко** (27.05.31 - 11.11.15). Андрей Алексеевич был выдающимся ученым, известным исследователем, ведущим специалистом нашей страны и мира в области палеогеографии и эволюции природной среды.

*Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Грант № 15-04-06499 а).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Величко, А. А. Природный процесс в плейстоцене / А. А. Величко // Москва: Наука, 1973. – 254 с.
2. Величко, А. А. К оценке тренда аридизации юга России: по результатам исследований разреза Семибалки-1, Приазовья / А. А. Величко [и др.] // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России: Сборник научных статей. – Ростов-на-Дону. Изд-во ЮНЦ РАН. – 2006. – С. 108 – 133.
3. Зыкина, В. С. Лессово-почвенная последовательность и эволюция природной среды и климата Западной Сибири в плейстоцене / В. С. Зыкина, В. С. Зыкин. – Новосибирск. – 2012. – 157 с.
4. Újvári, G. Origin, weathering, and geochemical composition of loess in southwestern Hungary / G. Újvári, A. Varga, Z. Balogh-Brunstad // Quaternary Research, 2008. – V. 69. – P. 421–437.
5. Zhang, W. Geochemical characteristics and environmental significance of Taledo loess-paleosol sequences of Pli Basin in



- Central Asia / W. Zhang, Z. Shi, G. Chen // *Environ Earth Sci.*, 2013. – P. 124–135.
6. *Khalidoun, A.* Biogeochemistry and inorganic geochemistry as indicators of the paleoenvironment and paleohydrology of the Al-Azraq basin, Jordan / A. Khalidoun // *Kansas City, Missouri*, 2013. – P. 238.
7. *Величко, А. А.* Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен / А. А. Величко // *Атлас-монография*. – Москва. – 2009. – 120 с.
8. *Maher, B. A.* Climate dependence of soil magnetism across the Russian steppe: significance for use of soil magnetism as a palaeoclimatic proxy / B. A. Maher, A. O. Alekseev, T. V. Alekseeva // *Quaternary Science Reviews*, 2002. – V. 21. – P. 1571–1576.
9. *Alekseeva, T.* Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried palaeosols / T. Alekseeva, A. Alekseev, B. A. Maher, V. Demkin // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007. – V. 249. – P. 103 – 127.
10. *Song, Y.* The spatial-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China / Y. Song, X. Wang, B. A. Maher // *Journal of Cleaner Production*, 2015. – P. 325–332.
11. *Maher, B.* Statistical models for use of palaeosol magnetic properties as proxies of palaeorainfall. / B. Maher, A. Possolo // *Global and Planetary Change*, 2013. – V.12 111. – P. 280–287.
12. *Maher, B. A.* The magnetic properties of Quaternary aeolian dusts and sediments and their palaeoclimatic significance / B. A. Maher // *Aeolian Res.*, 2011. – V. 3 (2). – P. 87–144.
13. *Калинин, П. И.* Геохимический подход к исследованию происхождения лессовых отложений юго-востока Русской равнины / П. И. Калинин, А. О. Алексеев // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология*. – 2013. – № 2. – С. 53–60.
14. *Калинин, П. И.* Лессы, палеопочвы и палеогеография квартера юго-востока Русской равнины / П. И. Калинин, А. О. Алексеев, А. Д. Савко // *Труды НИИ геологии Воронеж. гос. ун-та*. – Вып. 58. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 2009. – 140 с.
15. *Трофимов, В. Т.* Лессовый покров Земли и его свойства / В. А. Трофимов [и др.]. – М.: Изд-во МГУ. – 2001. – 464 с.
16. *Морозова, Т. Д.* Развитие почвенного покрова Европы в позднем плейстоцене / Т. А. Морозова. – М.: Наука, 1981. – 238 с.
17. *Nesbitt, H. W.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites / H. W. Nesbitt, G. M. Young // *Nature*, 1982. – V. 299. – P. 1523 – 1534.
18. *Retallack, G. J.* Soils of the Past: an Introduction to Paleopedology / G. J. Retallack // *Oxford: Blackwell*. – 2001. – 600 p.
19. *Gallet, S.* Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence China and paleoclimatic implications / S. Gallet, J. Borming, T. Masayuki // *Chemical Geology*, 1996. – V. 133. – P. 67–88.
20. *Перельман, А. И.* Геохимия. / А. И. Перельман. – М.: Высшая школа. – 1989. – С. 59.
21. *Sheldon, N. D.* Geochemical climofunctions from North American soils and application to paleosols across the Eocene–Oligocene boundary in Oregon / N. D. Sheldon, G. J. Retallack, S. Tanaka // *Journal of Geology*, 2002. – V. 110. – P. 687–696.
22. *Alekseev, A. O.* Magnetic properties and mineralogy of iron compounds in steppe soils. / A. O. Alekseev, T. V. Alekseeva, B. A. Maher // *Eurasian Soil Sci.*, 2003. – V. 36. – P. 59–70.
23. *Калинин, П. И.* Геохимическая характеристика лёссово-почвенных комплексов Терско-Кумской равнины и Азово-кубанской низменности / П. И. Калинин, А. О. Алексеев // *Почвоведение*, 2011. – № 12. – С. 1436–1453.

*Институт Физико-Химических и Биологических Проблем почвоведения Российской Академии Наук*

*Калинин Павел Иванович, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук  
E-mail: kalinin331@rambler.ru  
Тел.: +7(496) 731-81-09, Факс: +7(496) 733-05-95*

*Алексеев Андрей Олегович, Вр. И. О. директора института, заведующий лабораторией геохимии и минералогии почв, доктор биологических наук  
Тел.: +7(496) 731-81-09, Факс: +7(496) 733-05-95  
E-mail: alekseev@issp.serpukhov.su*

*Кудреватых Ирина Юрьевна, научный сотрудник, кандидат биологических наук  
Тел.: +7(496) 731-81-09, Факс: +7(496) 733-05-95  
E-mail: averkieva25@rambler.ru*

*Ваганов Ильдар Махмудович, научный сотрудник, кандидат биологических наук.  
E-mail: vagarovim@mail.ru  
Тел.: +7(496) 731-81-09, Факс: +7(496) 733-05-95*

*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science Russian Academy of Sciences*

*Kalinin P. I., Senior Research Scientist, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences  
Tel.: +7(496) 731-81-09, Fax: +7(496) 733-05-95  
E-mail: kalinin331@rambler.ru*

*Alekseev A. O., Acting Director of the Institute, Head of the Laboratory Geochemistry and Mineralogy of Soil, Doctor of Biological Sciences  
E-mail: alekseev@issp.serpukhov.su*

*Tel.: +7(496) 731-81-09, Fax: +7(496) 733-05-95  
Kudrevatykh I. Y., Research scientist, Candidate of Biological Sciences  
Tel.: +7(496) 731-81-09, Fax: +7(496) 733-05-95  
E-mail: averkieva25@rambler.ru*

*Vagarov I. M., Research scientist, Candidate of Biological Sciences  
E-mail: vagarovim@mail.ru  
Tel.: +7(496) 731-81-09, Fax: +7(496) 733-05-95*