

# ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЛЕССОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОКА РУССКОЙ РАВНИНЫ

П. И. Калинин, А. О. Алексеев

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

*Поступила в редакцию 27 августа 2013 г.*

**Аннотация.** Целью работы являлось изучение изменений химического состава лессовых отложений для выявления особенностей их формирования. Для этой цели с помощью метода рентгенофлуоресцентной спектроскопии был проведен сравнительный анализ химического состава разновозрастных лессово-почвенных комплексов (ЛПК) (разрезы «Отказное», «Порт-Катон», «Шабельское» и «Мелекино»), расположенных на территории Терско-Кумской равнины и Азово-Кубанской низменности.

**Ключевые слова:** плейстоцен, лессово-почвенные комплексы, геохимия, лесс, осадконакопление, эоловый перенос.

**Abstract.** The purpose of the work was investigation of changes in the chemical composition of loess deposits to identify the characteristics of their formation. A comparative analysis of the chemical compositions of the different aged Pleistocene loess-soil complexes (the Otkaznoe, Port-Katon, Shabelskoe and Melekinoprofiles) on the Terek-Kuma Plain and the Azov-Kuban Lowland was performed.

**Key words:** Pleistocene, loess-soil complexes, geochemistry, loess, deposition, aeolian transport

## Введение

Лессово-почвенный комплекс (ЛПК) – это крупный комплекс континентальных отложений преимущественно плейстоценового возраста, возникший в условиях чередования ледниковых и межледниковых эпох. Принято считать, что формирование лессов происходило в особых криоаридных условиях ледниковой под влиянием комплекса субэразальных процессов, в которых преобладала седиментация из воздуха алевритового материала [1, 5, 6, 16, 20]. Основными источниками материала для формирования лессовых отложений являются пустыни, зоны, подвергшиеся влиянию покровного оледенения, которое оставило после себя большое количество переработанного материала, а также продукты ветровой эрозии, накапливающиеся в крупных руслах рек. Формированию почв на материнском лессе отвечали межледниковые и интерстадиальные этапы, которые отличались ростом тепло- и влагообеспеченности, а также относительной стабилизацией поверхности.

Лессы содержат важную информацию об истории формирования внеледниковых территорий в плейстоцене. В этом отношении их можно сравнить с ледниковой формацией районов покровных

оледенений и рассматривать как земной эквивалент глубоководных записей изотопа кислорода четверичных ледниково-межледниковых циклов [12]. Они являются также важной составляющей модели глобальных изменений климата (AGCM) [13]. Лесс необычен тем, что представляет собой одно из немногих отложений, которое осаждается непосредственно из атмосферы. Это геологическое тело содержит в себе учет атмосферной циркуляции воздуха и может быть использовано для реконструкции направлений и интенсивности палеоветров. Кроме того, сами пылеватые частицы (так называемая аэрозольная пыль) в последнее время рассматриваются в роли явления, которое само по себе вызывает изменения климата [10, 20].

Таким образом, большой интерес к лессово-почвенным комплексам вызван не только тем, что они являются архивом древних климатических условий, но и их влиянием на общепланетарный радиационный баланс. Приазовье и Предкавказье, ввиду полноты и открытости разрезов четверичных отложений, являются одними из наиболее значимых в палеогеографическом отношении районов юга Восточно-Европейской равнины.

## Методика эксперимента

Целью работы являлось изучение химического состава лессовых отложений для выявления особенностей их формирования и оценки природных

условий в степной зоне юга Русской равнины в плейстоцене.

Геохимический подход к исследованию разновозрастных отложений представляет собой одну из самых динамично развивающихся областей в четвертичной геологии и палеоклиматологии. Геохимические параметры широко используются для решения многих задач, таких как определение источников лессообразования, интенсивности эолового переноса, определения климата и растительности в регионах осаднения и многих других [4, 5, 21].

Исследования лессовых отложений различных регионов мира показывают общее сходство в их геохимии с преобладанием  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$  [9, 14]. Они имеют сходство со средним составом

верхней континентальной коры (УСС) [19]. Однако несмотря на общую геохимическую схожесть, лесс различного происхождения часто различается через специальные геохимические параметры.

Объектами исследования были разновозрастные плейстоценовые лессово-почвенные комплексы, расположенные на территории Азово-Кубанской низменности (разрезы «Порт Катон», «Шабельское» и «Мелекино») и Терско-Кумской равнины (разрез «Отказное») (рис. 1). Описываемая территория расположена в пределах юго-восточной части Русской равнины и по характеру рельефа представляет собой равнинное пространство.

Терско-Кумская равнина находится за границей морских четвертичных трансгрессий [8]. Осадконакопление здесь определялось положением его в

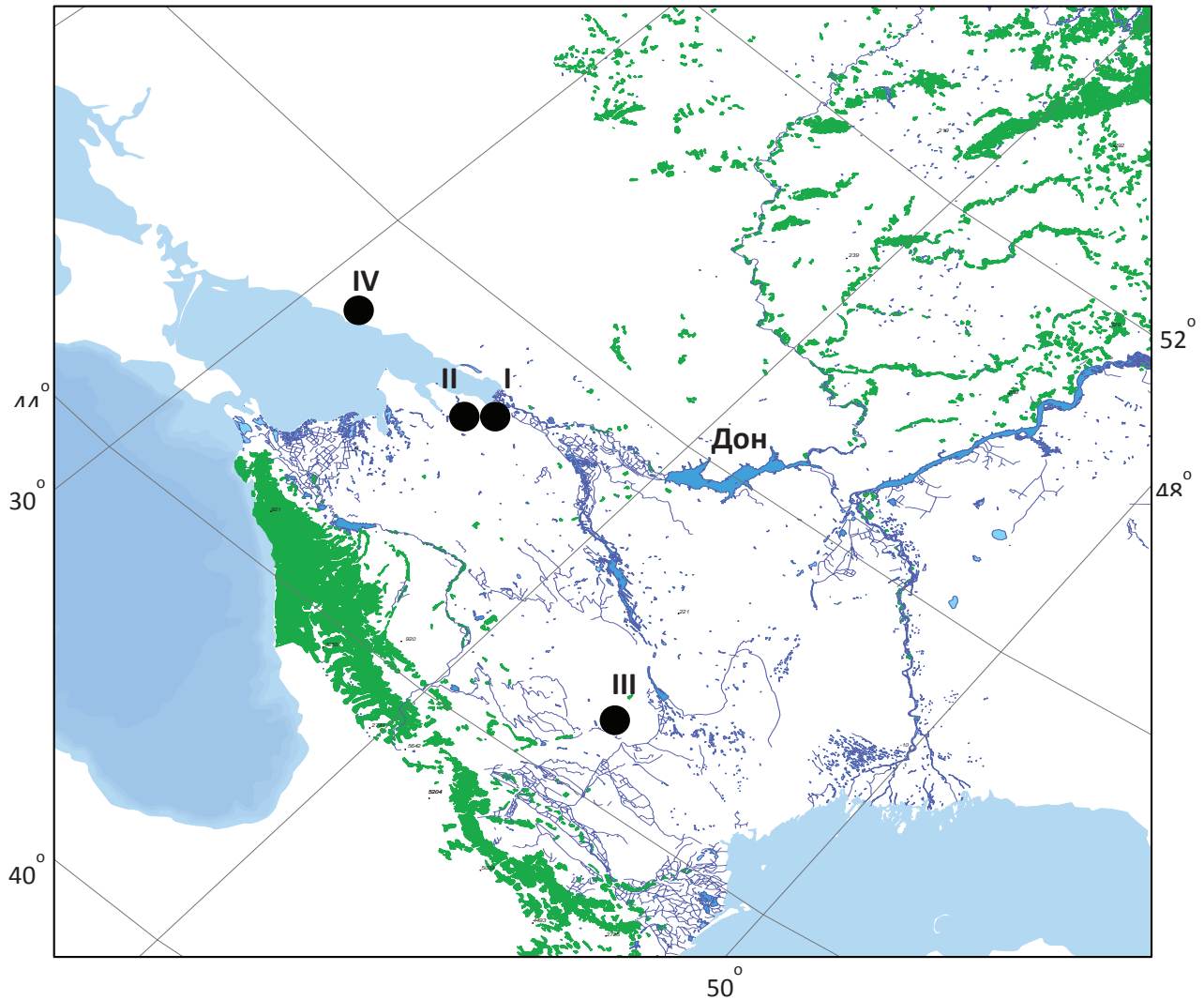


Рис. 1. Объекты исследования, карта-схема. Лессово-почвенные комплексы: I – разрез «Порт-Катон», II – разрез «Шабельское», III – разрез «Отказное», IV – разрез «Мелекино»

перигляциальной зоне, в области мощного лессонакопления и почвообразования. Мощность субаэральных отложений контролировалась постоянным восточным переносом эолового материала и более быстрым, по сравнению с периферией, опусканием центральной части Терско-Кумской депрессии, способствовавшим увеличению мощностей с запада на восток.

Азово-Кубанская низменность сформировалась в конце мезозоя – начале кайнозоя на разном и разновозрастном платформенном основании в тектонически активной зоне сочленения древней (докембрийской) Восточно-Европейской платформы с молодой (эпигердинской) Скифской платформой [6]. Осадочный чехол в пределах Ростовского выступа представлен породами мела, палеогена, неогена и квартера. Мощность чехла увеличивается в южном и юго-восточном направлениях. Неотектонический фон изучаемой территории определил ее развитие в неогене и четвертичном периоде. Господствующее прогибание в неогене привело к развитию морских бассейнов, лагунных и дельтовых обстановок в Доно-Азовском регионе. Конец неогена и четвертичное время ознаменовались слабым дифференцированным поднятием региона. Это привело к постепенному оттеснению водных бассейнов в пределы современных Каспийского и Черного морей, акватории которых впервые оформляются к концу плиоцена. Дифференцированный характер тектонических движений нашел отражение в различии геолого-геоморфологического строения северного и южного побережий Таганрогского залива. Северное побережье приподнято относительно южного, имеет высокие показатели густоты эрозионного расчленения.

В изученных разрезах представлены пять региональных комплексов ископаемых почв (снизу вверх): воронский (ПК5, ПК6), инжавинский (ПК4), каменский (ПК3), роменский (ПК2) и мезенский (ПК1) – и пять горизонтов лессов: коростылевский, борисоглебский, орчикский, днепровский и валдайский. В разрезах «Порт-Катон», «Шабельское» и «Мелекино» отсутствуют отложения роменской почвы и днепровского лесса [3, 7].

Измерения концентраций макро- и микроэлементов в породах и почвах осуществлялись на рентгеновском аппарате «СПЕКТРОСКАНМАКС – GV» по методике измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах методом рентгенфлуоресцентного анализа.

Для измерения были выбраны следующие элементы (основные порообразующие элементы,

представленные оксидами): Na<sub>2</sub>O, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, TiO<sub>2</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V, Cr, S, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Ba, Pb, Hg, Zr, Mo, Sn, Cd, Ce, Cs, Ga, La, Nb, Sc, Y, Yb.

Средняя проба измельчалась до пудры и помещалась в специальную кювету. Стандартная навеска составляла 2 грамма. Для измерения микроанализа массой 100 мг применялись специальные калибровки и технология изготовления образцов с применением кювет из борной кислоты.

Количественные калибровки производились с помощью комплекта Государственных стандартных образцов состава почв, а также стандартных образцов пород и почв, полученных от Института геологии университета Мехико (Мексика) [15].

### **Обсуждение результатов**

Изученные лессово-почвенные комплексы, в целом, имеют схожий химический состав с преобладанием SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO (табл. 1). Однако существуют и некоторые отличия. Так, лессовые горизонты разреза «Отказное» характеризуются повышенным содержанием SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и K<sub>2</sub>O и более низким содержанием CaO и MgO по сравнению с лессами Приазовья, что может служить свидетельством их принадлежности к другому геологическому району. Генезис лессовых пород Терско-Кумской равнины по сей день остается дискуссионным, но преобладают две основные точки зрения: делювиально-пролювиальная и эоловая [1]. Однако комплексное исследование лессовых пород Центрального и Восточного Предкавказья, проведенное Л. Г. Балаевым и П. В. Царевым [1], показало, что наиболее обоснованной является гипотеза об эоловом происхождении лессовых пород региона. С помощью изучения общего содержания в породе минералов тяжелой фракции также было установлено предполагаемое направление перемещения терригенных материалов.

При эоловом перемещении мелкозема происходит гравитационная дифференциация осадка по пути его следования, причем содержание в породе минералов тяжелой фракции закономерно уменьшается в направлении от областей питания к областям отложения материала. Полученные данные свидетельствуют о том, что перемещение терригенного материала при формировании лессов происходило в основном с востока на запад. В этом направлении уменьшалось содержание в породе кварца при соответствующем увеличении содержания полевых шпатов [1].

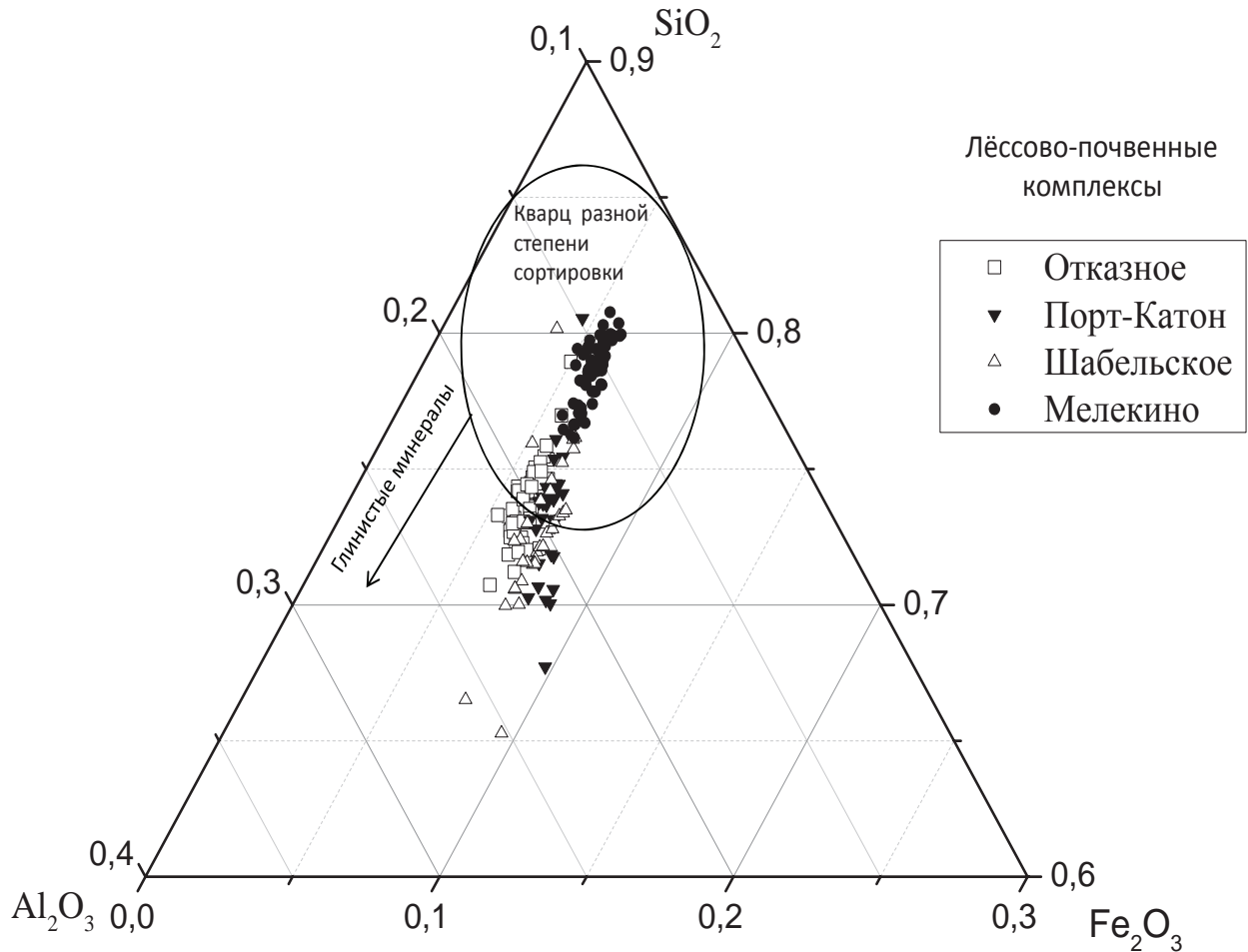


Рис. 2. Треугольная диаграмма  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $Fe_2O_3$  для характеристики минералов в коре выветривания и почвах по их химическому составу

Таблица 1

Среднее содержание основных элементов в лессовых горизонтах изученных лессово-почвенных комплексов

	“Отказное”	“Порт-Катон”	“Шабельское”	“Мелекино”
MgO (%)	1,14	1,35	1,70	2,15
$Al_2O_3$ (%)	15,99	14,11	13,54	11,13
$SiO_2$ (%)	56,55	52,00	52,85	56,25
$P_2O_5$ (%)	0,17	0,16	0,16	0,13
$K_2O$ (%)	2,38	2,21	2,13	1,90
CaO (%)	6,57	8,21	8,31	7,86
$TiO_2$ (%)	0,72	0,72	0,75	0,71
MnO (%)	0,09	0,08	0,07	0,07
$Fe_2O_3$ (%)	4,90	5,08	4,67	4,23
Zr (%)	0,024	0,023	0,027	0,029

Полученные нами данные демонстрируют, что в районе Приазовья в плейстоцене существовали несколько отличные условия осадконакопления. В частности, обращает на себя внимание химический состав лессовых отложений разреза «Мелекино», который отличается не только от химического состава лессов Предкавказья, но и от двух других изученных приазовских лессов. Он характеризуется повышенным содержанием  $SiO_2$ , MgO и Zr и минимальными значениями  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $Fe_2O_3$  (см. табл. 1). Высокое содержание  $SiO_2$  и Zr в лессовых горизонтах разреза «Мелекино» может говорить о том, что терригенный материал поступал в зону аккумуляции из источника, который находился ближе к Северному Приазовью. Это объясняется сортировкой зерен по размеру в процессе транспортировки и может рассматриваться как индикатор относительно короткой траектории пыли [21]. Как уже отмечалось выше, северное побережье Таганрогского залива приподнято относительно южного и имеет высокие показатели густоты эрозионного расчленения. ЛПК «Мелекино» находится в северной части Таганрогского залива и, по-видимому, геоморфологическое строение данной территории влияло на формирование и химический состав слагающих его лессовых отложений.

Если рассмотреть треугольную диаграмму  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $Fe_2O_3$ , предложенную J. Konta [11] для

характеристики минералов в коре выветривания и почвах по их химическому составу, то также обращает на себя внимание не столько отличие состава лессовых отложений Предкавказья (разрез «Отказное»), сколько отличный состава лессов ЛПК «Мелекино», который находится в самой северной точке исследуемого района (см. рис. 1). Диаграмма показывает, что изученные лессы попадают в область «кварца разной степени сортировки», причем минеральный состав лессовых отложений «Мелекино» характеризуется именно плохо отсортированным кварцем. Плохая сортировка кварцевых зерен, высокое содержание  $\text{SiO}_2$ , который по большей части присутствует в кварце и Zr, за который отвечает циркон, входящий в состав тяжелой фракции, а также пониженное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , которые присутствуют в составе полевых шпатов, говорят о том, что на территории Приазовья перенос терригенного материала мог осуществляться не с востока на запад, как в Предкавказье, а с севера на юг.

Чтобы оценить, в какие периоды на изученной территории отмечалась наибольшая интенсив-

ность осадконакопления, нами был изучен химический состав каждого лессового горизонта отдельно. Можно отметить общую тенденцию накопления  $\text{SiO}_2$  и Zr и уменьшение содержания  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  во всех изученных разрезах от более древних эпох к более современным (рис. 3, 4). Причем максимальные значения содержания  $\text{SiO}_2$  и Zr фиксируются в лессах разреза «Мелекино», сформированных в период валдайского оледенения. Это говорит об активизации золотого переноса в этот период. Последние исследования показывают, что для конца валдайской ледниковой эпохи на водоразделах Северо-Восточного Приазовья диагностируется этап интенсивного сноса, проявивший себя в активизации линейной эрозии и склоновых процессов, а следовательно, и появлении лессообразующего материала. Кроме того, валдайский лесс отличается увеличенной мощностью во всех изученных разрезах, что уже само по себе свидетельствует о более интенсивной аэральном седиментации в эпоху валдайского оледенения [6].

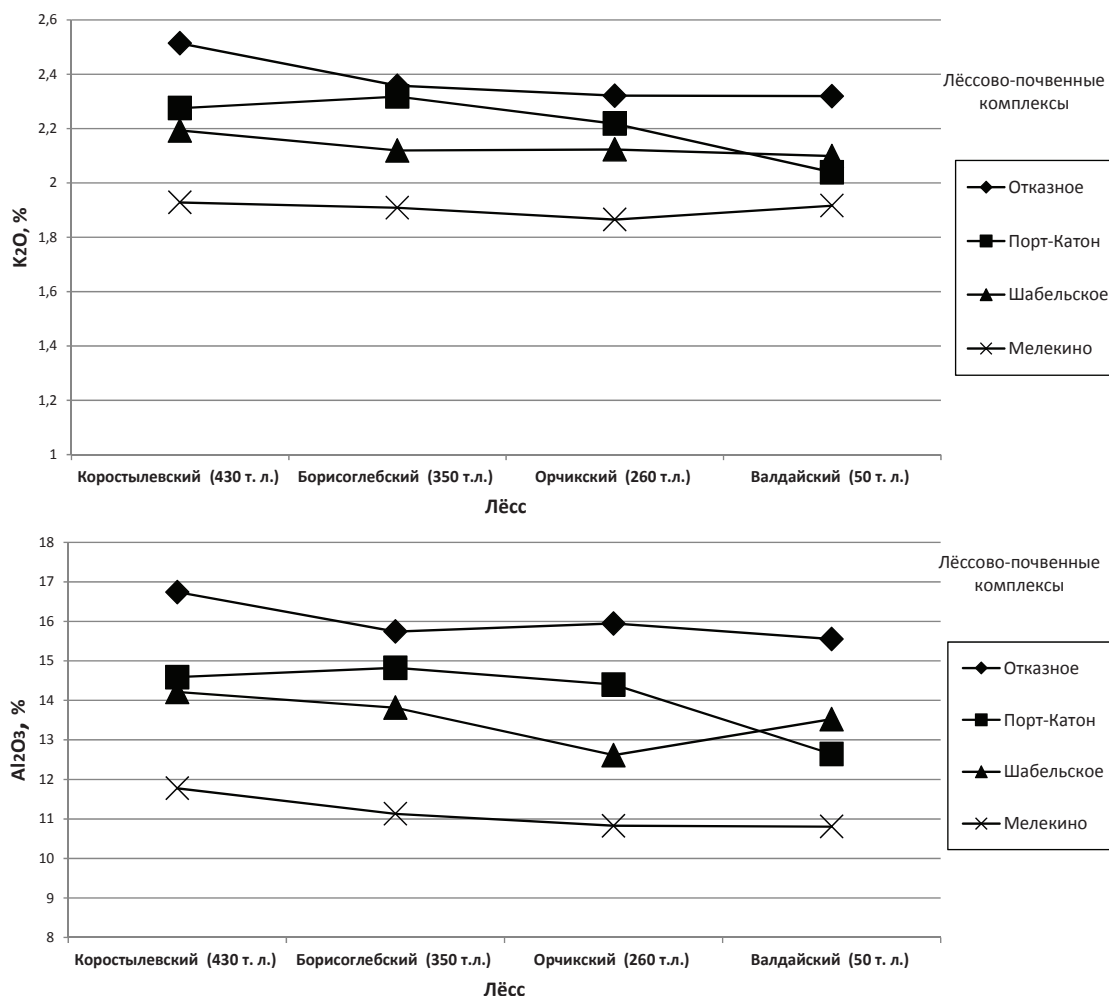


Рис. 3. Изменения содержаний  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в лессовых горизонтах различного возраста

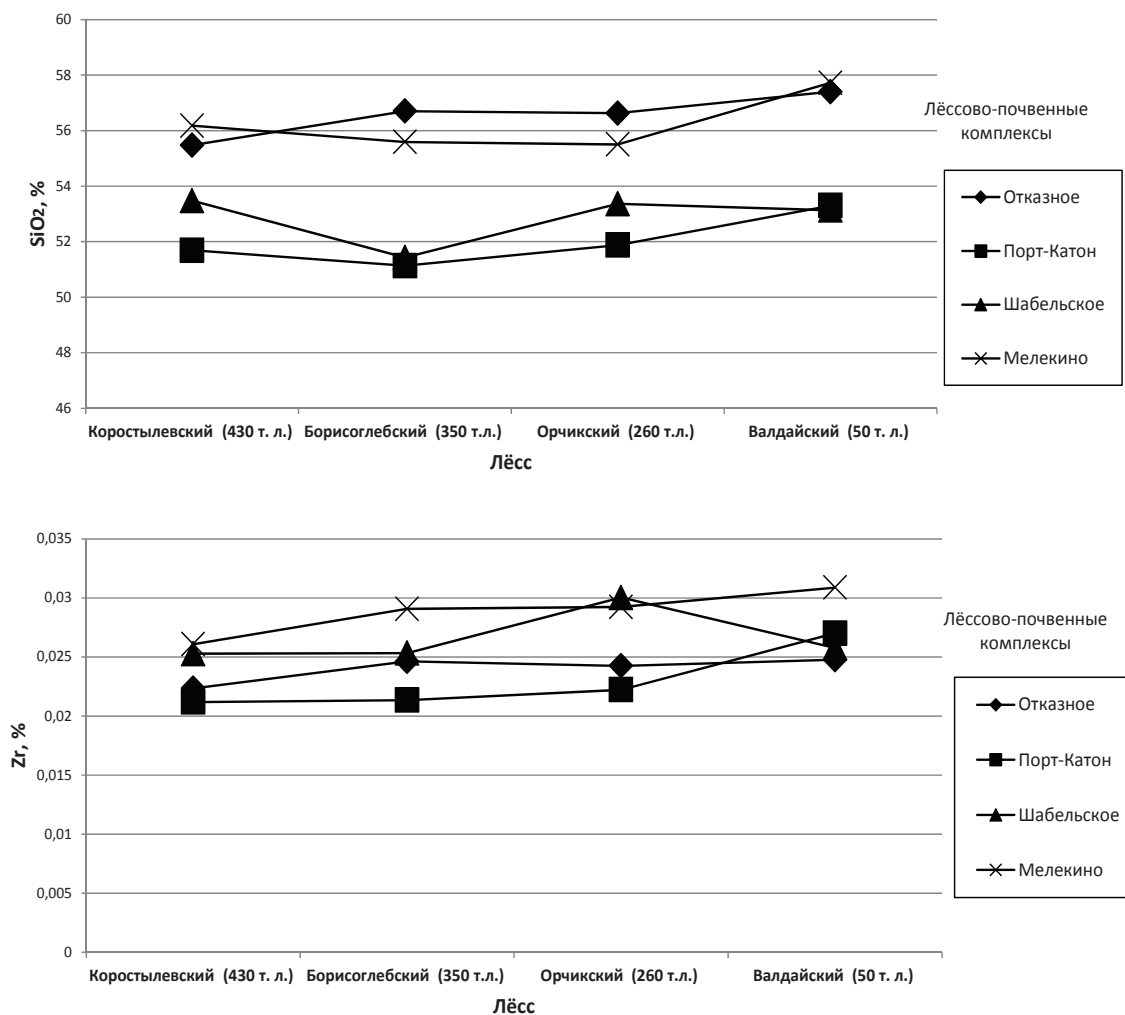


Рис. 4. Изменения содержаний SiO<sub>2</sub> и Zr в лёссовых горизонтах различного возраста

Еще одним показателем для оценки эолового привноса является изучение вариаций концентраций химически неподвижных элементов, таких как Ti, Zr, Nb, каждый из которых имеет относительно высокий ионный потенциал и считается химически неподвижным в приповерхностных горизонтах [2, 16].

Ti и Nb присутствуют в ильмените, рутиле, анатазе, титаномагнетите и сфене. Эти два элемента могут также присутствовать в биотите. В большинстве горных пород и почв Zr присутствует в цирконе. Нами была построена диаграмма отношения (Ti/Nb)/(Ti/Zr), которая была использована D. R. Muhs для определения источников привноса эолового материала в долину Роки Маунтин в Северной Америке, где применение этого коэффициента показало хорошие результаты [17]. Мы видим, что область распространения значений этого показателя в лёссах разреза «Мелекино» значительно отличается от показателей в трех

других разрезах, что подтверждает данные о том, что терригенный материал, из которого формировались лёссовые отложения ЛПК «Мелекино», несколько отличался от материала, сформировавшего другие ЛПК (рис. 5).

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают, что лёссовые отложения изученных разрезов имеют схожий химический состав с преобладанием SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO. Однако отмечаются некоторые отличия в условиях осадконакопления. Установлено, что химический состав лёссов Предкавказья (ЛПК «Отказное») несколько отличается от химического состава лёссов Приазовья, что, вероятно, связано с преобладанием на данной территории восточного переноса воздушных масс и поступлением материала с Кавказа.

Химический состав лёссов ЛПК «Мелекино», находящихся в Северо-Восточном Приазовье, от-

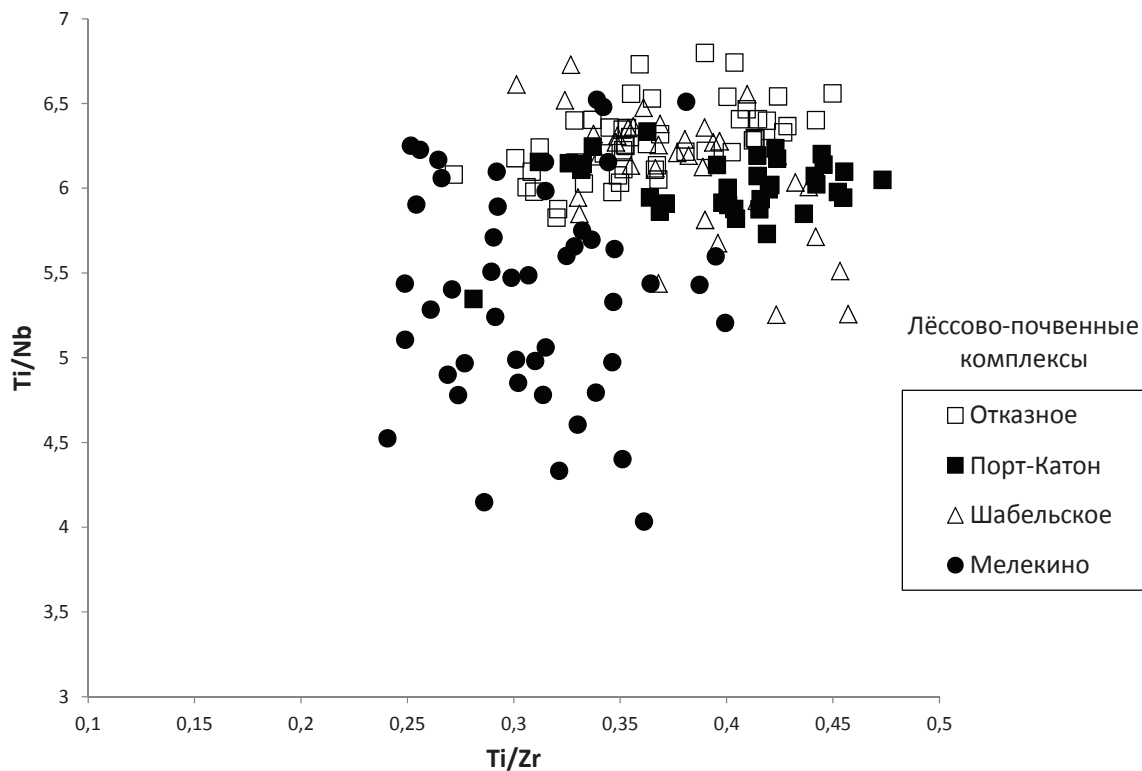


Рис. 5. Отношение  $(Ti/Nb)/(Ti/Zr)$  в лессах изученных лёссово-почвенных комплексов

личается как от лессов Предкавказья, так и от лессов Южного Приазовья. Плохая сортировка кварцевых зерен и высокое содержание Zr в лессовых горизонтах ЛПК «Мелекино» относительно лессов южного побережья Таганрогского залива говорит об относительно короткой траектории пыли и близости ее источника. Это может быть связано с различием геолого-геоморфологического строения северного и южного побережий Таганрогского залива, а также с переносом терригенного материала с севера на юг.

Отмечается общая тенденция накопления  $SiO_2$  и Zr и уменьшение содержания  $Al_2O_3$  и  $K_2O$  во всех изученных разрезах от более древних эпох к более современным. Это говорит об активизации эолового переноса в более поздние эпохи плейстоцена, в частности, в валдайское оледенение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Балаев Л. Г. Лессовые породы Центрального и Восточного Предкавказья / Л. Г. Балаев, П. В. Царев // М.: Наука, 1964. – 246 с.
2. Бушинский Г. И. Титанвосадочном процессе / Г. И. Бушинский. Литология и полезные ископаемые. – 1963. – № 2.
3. Величко А. А. К оценке тренда аридизации юга России: по результатам исследований разреза Семибалки-1, Приазовье / 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.

4. Калинин П. И. Лессы, палеопочвы и палеогеография квартера юго-востока Русской равнины / П. И. Калинин, А. О. Алексеев, А. Д. Савко // Тр. науч. исслед. ин-та геологии Воронежского государственного ун-та. – 2009. – Вып. 58. – 140 с.

5. 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.

6. Константинов Е. А. Эволюция рельефа северо-восточного Приазовья в плейстоцене (по материалам изучения лёссово-почвенной формации) : автореф. дисс. ... канд. геогр. наук / Е. А. Константинов. – М., 2013. – 28 с.

7. Рысков Я. Г. Реконструкция палеотемператур и осадков в Плейстоцене по изотопному составу гумуса и карбонатов лессов Русской равнины / Я. Г. Рысков [и др.] // Почвоведение. – 2008. – № 9. – С. 1062–1070.

8. Спиридонов А. И. Геоморфология европейской части СССР / А. И. Спиридонов. – М., 1978. – 335 с.

9. Guo Z. T. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China / Z. T. Guo [et al.] // Nature. – 2002. – V. 416. – V. 159–163.

10. Harrison S. P. The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future /

- S. P. Harrison [et al.] // *Earth-Science Reviews*. – 2001. – V. 54. – P. 43–80.
11. *Konta Jiří*. Phyllosilicates in the sediment-forming processes: weathering, erosion, transportation, and deposition / Jiří Konta // *Actageodyn. Geomater.* – 2009. – Vol. 6, № 1 (153). – P. 13–43.
12. *Kukla G.* Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility / G. Kukla [et al.] // *Geology*. – 1988. – V. 16. – P. 811–814.
13. *Kutzbach J. E.* Simulated climatic changes: results of the COHMAP climate–model experiments / J. E. Kutzbach [et al.] // *Global Climates Since the Last Glacial Maximum*. University of Minnesota Press, Minneapolis. – 1993. – P. 24–93.
14. *Liang M. Y.* Geochemical characteristic of the Miocene eolian deposits in China: Their provenance and climate implications / M. Y. Liang [et al.] // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. – 2009. – V. 10.
15. *Lozano Rufino*. Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis / Rufino Lozano, Juan Pablo Bernal // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. – 2005. – V. 22, № 3. – P. 329–344.
16. *McLennan S. M.* Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes / S. M. McLennan // *Reviews in Mineralogy*. – 1989. – V. 21. – P. 169–200.
17. *Muhs Daniel R.* Eolian Additions to Late Quaternary Alpine Soils, Indian Peaks Wilderness Area, Colorado Front Range / Daniel R. Muhs, James B. Benedict // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. – 2006. – Vol. 38, № 1. – P. 120–130.
18. *Schilman Bettina*. Global climate instability reflected by Eastern Mediterranean marine records during the late Holocene / Bettina Schilman // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2001. – V. 176. – P. 157–176.
19. *Taylor S. R.* The Continental Crust: Its Composition and Evolution / S. R. Taylor, S. McLennan // Blackwell. Oxford. – 1985.
20. *Tegen I.* The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils / I. Tegen, A. A. Lacis, I. Fung // *Nature*. – 1996. – V. 380. – P. 419–422.
21. *Zhengtang GUO*. Loess geochemistry and Cenozoic paleoenvironments / GUO Zhengtang // *Geochemical News*. – 2010. – V. 143.

*Институт физико-химических и биологических  
Проблем почвоведения РАН, Пушкино*

*П. И. Калинин, научный сотрудник*

*Тел. 8 (4967) 31-81-09*

*Факс: 8 (4967) 33-05-95*

*kalinin331@rambler.ru*

*А. О. Алексеев, заведующий лабораторией геохимии  
и минералогии почв, доктор биологических наук,  
старший научный сотрудник*

*Тел. 8 (4967) 73-04-41*

*Факс: 8 (4967) 33-05-95*

*alekseev@issp.serpukhov.su*

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

*P. I. Kalinin, Researcher*

*Tel. 8 (4967) 31-81-09*

*Fax: 8 (4967) 33-05-95*

*kalinin331@rambler.ru*

*A. O. Alekseev, Head of the Laboratory of Geochemistry  
and mineralogy of soils, Doctor of Biological Sciences,  
Senior Research Fellow*

*Tel. 8 (4967) 73-04-41*

*Fax: 8 (4967) 33-05-95*

*alekseev@issp.serpukhov.su*