

ЛЁССОНАКОПЛЕНИЕ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ В КОНЦЕ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ПЕРИОДА

© 2022 г. Е. А. Константинов^{a,*}, А. Л. Захаров^{a,**}, Н. В. Сычёв^{a,***}, Е. А. Мазнева^{a,****},
Р. Н. Курбанов^{a,b,*****}, П. А. Морозова^{a,*****}

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

^bГеографический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: eakonst@igras.ru

**E-mail: alzakharov@igras.ru

***E-mail: nvsychev25@igras.ru

****E-mail: elena.mazneva@igras.ru

*****E-mail: kurbanov@igras.ru

*****E-mail: morozova_polina@igras.ru

Поступила в редакцию 31.01.2022 г.

После доработки 06.02.2022 г.

Принята к публикации 20.02.2022 г.

Происхождение лёссовых отложений Предкавказья, образующих практически сплошной покров на равнинах от Азовского моря до Прикаспийской низменности, остаётся одним из дискуссионных вопросов палеогеографии юга Европейской России. Феноменально высокая мощность лёссово-палеопочвенных серий (ЛПС) на востоке региона (до 140 м) и протяжённые береговые обнажения на западе вызывают особый интерес геологов и географов, рассматривающих эти толщи как своеобразную летопись природных условий четвертичного периода.

В статье анализируются данные по строению, механическому составу и возрасту ЛПС верхнего плейстоцена и голоцена, полученные на основе изучения 25 скважин и разрезов, распределённых по территории Предкавказья. Рассчитаны средние темпы осадконакопления и средние содержания песчаной фракции для стратиграфических единиц, соотносимых с глобальными климатостратиграфическими подразделениями — морскими изотопными стадиями (МИС). Установлено, что источниками (областями дефляции) минеральной пыли, которая и формирует лёссовый покров, являются долины и приустьевые аллювиальные равнины крупных рек — Терека, Кумы, Волги, Кубани и Дона. Доминирующим на протяжении всего позднего плейстоцена и голоцена источником является Прикаспийская низменность. Крупные массивы слабозакреплённых песков и супесей западного Прикаспия в сочетании с высокой засушливостью климата и сильными восточными ветрами создали предпосылки для переноса огромных масс минеральной пыли на запад вплоть до Азовского моря.

Ключевые слова: лёсс, Предкавказье, поздний плейстоцен, голоцен, эоловые процессы, дефляция, питающие провинции, осадконакопление, палеоклимат.

DOI: 10.31857/S0869587322060068

Содержание минерального аэрозоля (пыли) в атмосфере тесно связано с климатическими

КОНСТАНТИНОВ Евгений Александрович — кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИГ РАН. ЗАХАРОВ Андрей Леонидович — кандидат географических наук, научный сотрудник ИГ РАН. СЫЧЁВ Никита Владиславович — инженер-исследователь ИГ РАН. МАЗНЕВА Елена Андреевна — младший научный сотрудник ИГ РАН. КУРБАНОВ Реджеп Нурмурадович — кандидат географических наук, старший научный сотрудник ИГ РАН, старший научный сотрудник МГУ им. М.В. Ломоносова. МОРОЗОВА Полина Анатольевна — младший научный сотрудник ИГ РАН.

условиями на Земле в целом и в отдельных её регионах. Объёмы пыли, переносимой в воздушной среде, контролируются прежде всего степенью засушливости климата, площадью источников пыли и ветровым режимом [1, 2]. Изменение этих факторов в геологическом прошлом можно проследить через интенсивность пыленакопления в седиментационных палеоархивах — природных осадочных летописях — ледниковых, морских, озёрно-болотных, лёссовых и др.

На континентах в зонах устойчивого накопления минеральной пыли сформированы массивы лёссовых отложений. Они занимают огромные

площади в умеренных широтах обоих полушарий — суммарно около 6% земной суши [3]. Лёссы представляют собой слабосцементированную карбонатами неслоистую обломочную горную породу, сложенную преимущественно алевритом с примесью глины и тонкого песка. Они распространены в основном на равнинах и имеют покровное залегание. В строении лёссового чехла, как правило, наблюдается чередование светлых и тёмных горизонтов — так называемых чистых лёссов, отвечающих засушливым и холодным условиям, и палеопочв, приуроченных к более влажным и тёплым условиям. В совокупности этот “слоёный пирог” называют лёссово-палеопочвенными сериями (ЛПС). ЛПС отличаются от других континентальных палеоархивов четвертичного периода своей широкой распространённостью в засушливых областях умеренного пояса и большим временным охватом геологической летописи — до 2—3 млн лет. Эти особенности позволяют проводить широкие площадные реконструкции ландшафтов, гидротермального режима атмосферы и направления приземных ветров для семиаридных континентальных регионов в интервале всего четвертичного периода. Благодаря этому ЛПС привлекают огромное внимание геологов и палеогеографов уже более 150 лет.

Один из крупнейших по площади лёссовых ареалов на Земле расположен на юге Восточно-Европейской равнины. Наше внимание привлекла особая область этого ареала, расположенная между Азовским морем и Прикаспийской низменностью, — Предкавказская. Лёссовые отложения в Предкавказье покрывают почти сплошным чехлом междуречья и высокие речные террасы [4–6]. Возраст их подошвы может достигать 700–800 тыс. лет [7], мощность (толщина) чехла колеблется от 10–30 м на западе — у берегов Азовского моря, до 100–140 м на востоке — в Терско-Кумской низменности [8]. У верхнечетвертичной ЛПС, сформировавшейся за последние 130 тыс. лет, этот показатель может превышать 35 метров на востоке региона [4]. Столь высокие мощности являются феноменальными для Восточно-Европейской равнины, да и для всей Европы.

Несмотря на многолетнюю историю изучения ЛПС Предкавказья, до сих пор нет исчерпывающего объяснения природы необычайно высокой мощности отложений. До конца не решены вопросы об источниках поступления и механизмах накопления пылеватого материала [9–12], нет надёжных моделей пространственной и временной изменчивости скоростей накопления лёссов. В основном указанные проблемы связаны с недостатком достоверных данных о строении, возрасте и составе ЛПС. За последние 10 лет благодаря изучению новых разрезов и скважин, внедрению методов люминесцентного датирования и массово-

го вещественного анализа отложений удалось создать предпосылки для решения указанных проблем.

В данной статье обобщаются результаты исследований строения, состава и стратиграфии верхнечетвертичных лёссов Предкавказья, которые были частично получены авторским коллективом, а частично заимствованы из литературных источников. Предметом работы стал анализ собранных данных, а целью — определение факторов накопления, источников и направления переноса минеральной пыли в Предкавказье за последние 130 тыс. лет.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование опирается на анализ пространственной и временной изменчивости скоростей осадконакопления и содержания песчаной фракции в ЛПС. Этот подход был неоднократно апробирован при изучении палеогеографии Китайского лёссового плато, лёссовых областей Северной Америки и Центральной Европы [2, 13–15] и зарекомендовал себя как надёжный метод определения источников минеральной пыли, выявления этапов аридизации и увлажнения, а также реконструкции атмосферной циркуляции. Подход опирается на теоретические представления о факторах, определяющих мощность и механический состав лёссов [16, 9].

Хорошо известно, что в воздушном потоке происходит сортировка материала. Далеко от источника, на десятки и сотни километров, улетают преимущественно мелкие частицы алеврита (0.005–0.05 мм) и глины (<0.005 мм), которые поднимаются высоко в воздух во время пылевых бурь. Относительно крупные песчаные частицы (размером от 0.05 до 2 мм) редко отрываются высоко от поверхности. Как правило, они перемещаются на относительно небольшие расстояния путём сальтации (скачкообразно) или волочения по поверхности [1]. Таким образом, доля песка в лёссе, при прочих равных условиях, убывает по мере удаления участка аккумуляции от источника минеральной пыли — песчаного массива, подвергаемого дефляции. Большое влияние на содержание песка оказывают скорость и направление приземных ветров [16], которые в свою очередь определяются рельефом и климатическими условиями.

Средние темпы аккумуляции лёсса также связаны с расстоянием до источника пыли. По мере приближения к области дефляции скорость осадконакопления возрастает нелинейно, быстро увеличиваясь вблизи источника [2]. Скорость аккумуляции сильно зависит от коэффициента увлажнения климата, который влияет на устойчивость

поверхности к дефляции через влажность грунта и густоту растительного покрова [1]. Аридизация климата способствует расширению областей дефляции, что провоцирует рост объёмов транспорта минеральной пыли и, как следствие, её накопления в областях аккумуляции. На интенсивность пылеобразования влияет и состав субстрата в области дефляции [1]. Например, аллювиальные пески представляют собой податливый субстрат для ветровой эрозии, при которой в воздух поднимаются огромные пылевые массы. А вот глинистая или соляная корка, наоборот, блокируют дефляцию, снижая интенсивность пылеобразования. Состояние поверхности в области аккумуляции — не менее значимый фактор, так как эоловый материал должен закрепиться, чтобы превратиться в стабильный осадок. Здесь важное значение имеет плотность растительного покрова, который задерживает минеральную пыль и препятствует дефляции [1]. Колебания уровня морских бассейнов — один из специфических региональных факторов, который существенно влияет на площади источников минеральной пыли и, как следствие, на объёмы её продукции.

В нашем исследовании темпы осадконакопления для отдельных хроностратиграфических интервалов определялись нахождением отношения вертикальной мощности слоя к его возрасту. Для этого необходимо с достаточно высокой точностью определить возрастные границы стратиграфических подразделений в осадке. Теоретическая возможность корректного решения такой задачи применительно к верхнечетвертичным лёссам Предкавказья возникла относительно недавно. Во-первых, для плакорных ЛПС Предкавказья показана высокая стратиграфическая и морфологическая выдержанность [17, 18]. Во-вторых, в начале XXI столетия группой А.А. Величко была создана надёжная стратиграфическая схема ЛПС юга Европейской России, которая увязана с глобальными климатостратиграфическими шкалами [19]. В-третьих, в последние несколько лет появилась серия подробно датированных люминесцентными методами разрезов верхнечетвертичных лёссов, которые могут считаться опорными, — Беглица, Чумбур-Коса, Воронцовка, Отказное [20–23]. Последнее обстоятельство позволило детализировать схему А.А. Величко и открыло широкие возможности для прямой возрастной корреляции удалённых разрезов по литологическим маркерам в осадке — узнаваемым вариациям состава.

Во всех проанализированных нами лёссовых колонках и разрезах производилось стратиграфическое членение на основе схемы А.А. Величко, увязанной с морскими изотопными стадиями (МИС) [24]: голоценовая почва — МИС 1 (0–14 тыс. л.н.), алтыново-деснинский лёсс — МИС 2 (14–29 тыс. л.н.), брянская почва — МИС 3 (29–57 тыс. л.н.), хоты-

лёвский лёсс — МИС 4 (57–71 тыс. л.н.), мезинский педокомплекс — МИС 5 (71–130 тыс. л.н.), сальнская почва мезинского педокомплекса — МИС 5e (115–130 тыс. л.н.). Такое членение стало основой для расчёта средних темпов аккумуляции для каждой МИС и среднего содержания песка внутри заданного интервала.

Значимыми ограничениями данной методики расчёта являются ошибки в определении границ стратиграфических подразделений и возможные перерывы в осадконакоплении. Первое ограничение особенно актуально для колонок, заимствованных из старых литературных источников. Здесь отсутствуют люминесцентные даты, обеспеченность литологическими анализами низкая: шаг отбора образцов составляет 30–50 см. В таких колонках нами производилась поправка границ стратиграфических подразделений на основе корреляции с более надёжными колонками, однако достоверность расчётных параметров остаётся не очень высокой. В полученных нами колонках определение границ стратиграфических подразделений также может содержать ошибки. Поэтому погрешность расчёта оценивается нами в среднем в 30–40% для колонок без люминесцентных дат.

Весьма существенным представляется второе ограничение, связанное с возможной эрозией части лёссовой толщи. Для минимизации роли линейной эрозии и плоскостного смыва нами выбирались только колонки и разрезы, расположенные на участках плоских междуречий, лишённых следов водной эрозии. Однако и здесь не исключены перерывы, обусловленные возможной ветровой эрозией (дефляцией). Часто на наличие перерывов указывают резкие границы в осадке; такие ЛПС нами не рассматривались. Косвенный признак наличия перерывов — аномально низкие значения темпов аккумуляции при сравнении с соседними точками. Так как влияние фактора эрозии весьма вероятно для всех ЛПС [25], нашу расчётную оценку темпов аккумуляции можно считать минимальной.

В таблице 1 приведены все колонки и разрезы, учтённые в нашем исследовании (всего 25). Приведён их краткий индекс, название, местоположение, указан источник данных. Девять точек расположены в северо-восточном Приазовье: Ys, Bg, V4, V8, C3, M1, Sm, Nk, Chk. Это объясняется наличием протяжённых береговых обрывов Азовского моря, облегчающих изучение разрезов, и давней историей исследований. Вторая по численности группа точек, представленная буровыми скважинами, принадлежит Азово-Кубанской равнине (An, Pt, Np, Sb, Pm). На правобережье среднего течения Кубани находятся три точки — две скважины и один разрез (UL, Kz, Tm). На востоке региона, в Терско-Кумской низменно-

Таблица 1. Горные выработки, по которым рассчитаны средние темпы лёссонакопления и средние содержания песчаной фракции в лёссе для отдельных климатостратиграфических подразделений

Индекс	Название	Тип горной выработки	Источник данных	Широта, N°	Долгота, E°
Ys	Ясенская	скважина	материалы коллектива авторов	46.37894	38.1376
Ap	Андрюшенко	скважина	материалы коллектива авторов	46.21666	39.44257
Sb	Сладкая балка	скважина	[22]	45.53076	41.45168
Pm	Первомайская	скважина	материалы коллектива авторов	46.08998	42.2663
Ot	Отказное	скважина	[22, 23]	44.34696	43.87704
Bg	Беглица	разрез	[22]	47.12711	38.51572
V4	Воронцовка-4	разрез	[22]	46.65879	38.08044
V8	Воронцовка-8	разрез	[22]	46.63989	38.03467
C3	Червоная падь	скважина	[25]	46.63303	37.94581
UL	Усть-Лабинск	скважина	[8]	45.18426	39.53535
Nk	Никольская	скважина	материалы коллектива авторов	47.22577	38.72967
Chk	Чумбур-Коса	разрез	[21]	46.9693	38.96485
MI	Мелекино	разрез	[7]	46.99178	37.4395
Sm	Семибалки-1	разрез	[27]	47.0099	39.0397
VI	Волгодонск	скважина	[8]	47.48997	42.24067
Np	Новопокровское	скважина	[8]	45.96554	40.81781
Bd	Будёновск	скважина	[8]	44.80022	44.11223
Dv	Дивное	скважина	[4]	45.88782	43.28588
St	Степное	скважина	[8]	44.21464	44.57899
Pt	Петровка	скважина	материалы коллектива авторов	46.7375	40.8196
P	Пятилетка	скважина	материалы коллектива авторов	47.11321	43.28445
Kz	Казанская	скважина	материалы коллектива авторов	45.40754	40.35823
Mh	Михайловское	скважина	материалы коллектива авторов	47.67952	40.95896
Tm	Темижбекская	скважина	материалы коллектива авторов	45.43177	40.84136
SA	Средняя Ахтуба	разрез	[28]	48.700278	44.893611

сти, расположены три скважины (Bd, Ot, St), по одной скважине — в пределах Сальско-Манычского междуречья (P) и бассейна нижнего Калауса (Dv), две буровые скважины — в бассейне нижнего Дона (Mh, VI). Разрез Средняя Ахтуба (SA) в Нижнем Поволжье вскрывает строение ЛПС, погребённой под морскими хвалынскими отложениями конца верхнего плейстоцена.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛЁССОВЫХ И ПЕСЧАНЫХ ПОРОД

С целью выявления потенциальных источников и направлений потоков минеральной пыли проведён анализ распространения лёссовых и песчаных пород. На основе открытых карт четвертичных отложений составлена сводная карта приповерхностного залегания этих литологиче-

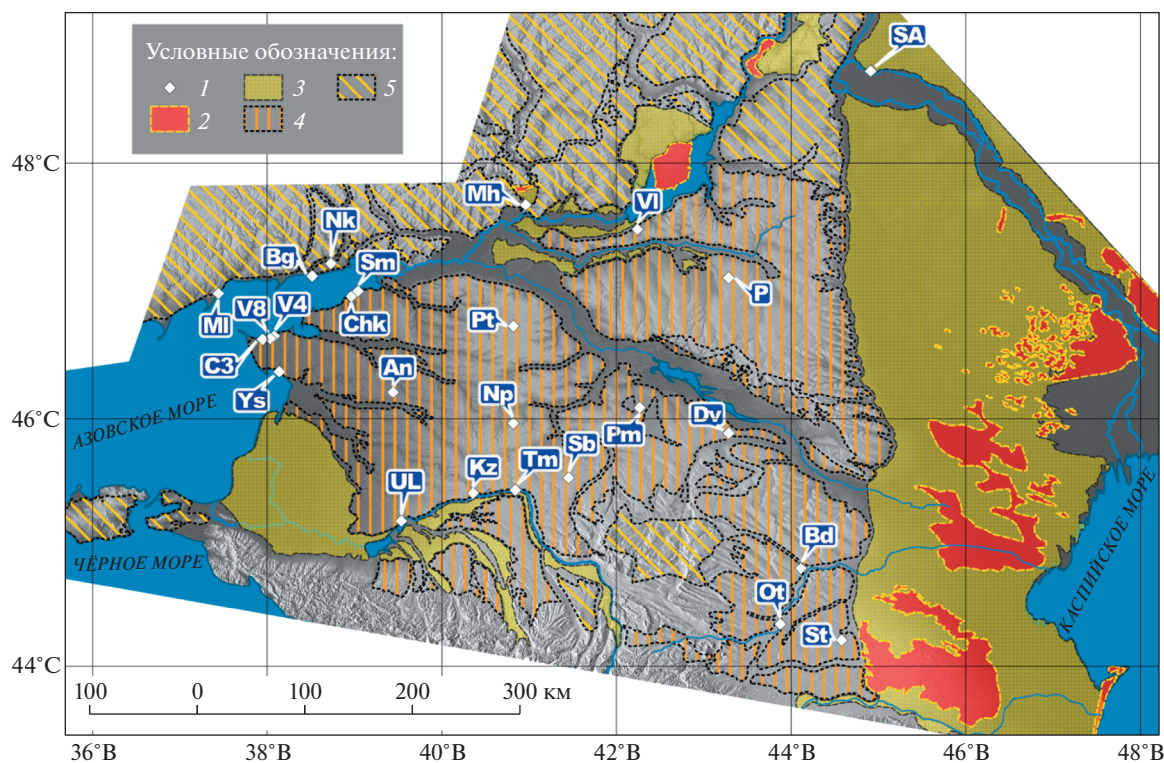


Рис. 1. Карта распространения лёссовых и песчаных пород в Понто-Каспийском регионе. Составлена по [29–33]. Топографическая основа — модель SRTM

Условные обозначения: 1 — разрезы и скважины, фигурирующие в работе (см. таблицу 1), 2 — незакреплённые эоловые пески, 3 — закреплённые и погребённые верхнеплейстоценовые пески и супеси, 4 — лёссы сплошного распространения, 5 — лёссы прерывистого распространения

ских разностей осадочных пород (рис. 1). Области распространения лёссовых пород разделены нами на два типа: сплошного и прерывистого распространения. Стоит оговориться, что речь идёт только о первичных эоловых лёссах. Делювиальные лёссовидные суглинки в данном исследовании не рассматриваются. Лёссы сплошного распространения приурочены к обширным междуречным пространствам низких равнин, где густота эрозионного расчленения относительно невелика. К этому типу относятся Азово-Кубанская и Терско-Кумская низменности.

Прерывистое распространение лёссов приурочено к зонам активного неотектонического поднятия — Ставропольской возвышенности, Приазовскому массиву, Донецкому кряжу и др. [34]. Эти территории характеризуются высокой густотой долинно-балочной сети. Сохранность лёссовых палеоархивов в областях прерывистого распространения, как правило, ниже ввиду больших площадей склонов и более интенсивной плоскостной и линейной эрозии. Типичные эоловые лёссы верхнего плейстоцена встречаются здесь лишь на ограниченных участках вершинных поверхностей междуречий и высоких террасах.

Области распространения песков также были поделены на два типа: незакреплённые эоловые пески и закреплённые и погребённые пески и су-

песи. В областях первого типа наблюдаются современные подвижные дюны, дюнные цепи, грядовые пески [9]. Они распространены на террасах Нижнего Дона и, особенно, в Прикаспийской низменности. В Прикаспии подвижные песчаные массивы тяготеют к палеодельтам и палеоруслу крупнейших рек — Терека, Кумы и Волги. Субстратом для развития эоловых форм рельефа служит плейстоценовый аллювий этих рек.

Площадь распространения закреплённых и погребённых песков и супесей примерно в 3.5 раза больше, чем подвижных песков. Значительные площади Прикаспийской низменности покрыты песками и супесями, закреплёнными растительностью. Ещё более широко распространены верхнеплейстоценовые пески и супеси, погребённые под глинистыми морскими отложениями [28, 35]. Вторая по площади область распространения закреплённых и погребённых верхнеплейстоценовых песков приурочена к террасам и дельте реки Кубань. В настоящее время на террасах и в верхней части дельты пески покрыты маломощным (первые метры) лёссовым чехлом. В нижней части дельты пески сильно увлажнены ввиду высокого уровня грунтовых вод. Широко распространены погребённые верхнеплейстоценовые пески на террасах Нижнего Дона и его притоков. Они

Таблица 2. Среднее содержание песчаной фракции (%) в лёссовых и палеопочвенных горизонтах, соответствующих основным климатостратиграфическим подразделениям верхнего плейстоцена и голоцена

Индекс горной выработки	Голоценовая почва/МИС 1	Алтыново-деснинский лёсс/МИС 2	Брянская палеопочва/МИС 3	Хотылёвский лёсс/МИС 4	Мезинский педокомплекс/МИС 5	Салынская палеопочва/МИС 5e
Ys	2.9	4.1	4.3	4.1	3.6	4.0
An	5.1	7.0	5.0	7.0	8.3	4.4
Sb	8.0	16.5	13.0	12.9	12.8	13.4
Pm	6.7	9.7	10.1	11.2	11.6	9.2
Ot	18.9	29.6	24.9	25.3	16.0	13.0
Bg	13.4	14.0	9.8	10.4	20.7	9.7
V4	2.3	2.3	2.3	2.3	1.6	1.5
V8	1.6	3.4	0.9	1.3	1.1	1.1
C3	4.5	2.5	2.3	2.4	3.9	4.0
UL	22.8	28.3	18.7	30.4	20.3	17.6
Nk	14.0	18.2	19.3	18.6	21.5	22.8
Chk	3.0	2.3	3.6	2.5	6.5	7.5
MI	10.0	13.0	6.0	5.0	8.0	6.0
Sm	3.0	5.0	2.0	1.0	2.5	3.0
VI	7.0	23.0	18.0	20.0	19.0	15.0
Np	7.0	15.0	13.0	15.0	14.0	8.0
Bd	25.0	45.0	37.0	45.0	40.0	30.0
Dv	18.6	18.7	16.5	22.6	24.2	20.9
St	36.9	45.8	39.4	44.0	—	—
Pt	4.8	4.8	6.2	5.4	5.4	4.0
P	6.3	7.3	8.7	10.0	8.6	7.8
Kz	15.8	16.0	7.6	11.9	12.6	12.5
Mh	16.7	27.0	24.5	29.5	15.4	5.6
Tm	32.1	28.8	8.0	—	6.8	—
SA	—	—	—	25.0	10.0	5.0

покрыты чехлом из маломощных лёссовидных суглинков.

Для значительной доли закреплённых и погребённых песков и супесей нет прямых свидетельств их эоловой переработки в прошлом. Без дополнительных исследований нельзя утверждать, что все эти отложения были вовлечены в эоловый транспорт. Однако общая площадь распространения приповерхностных песчаных пород в регионе наглядно свидетельствует об огромном потенциале быстрого расширения источников минеральной пыли в позднем плейстоцене при условии аридизации климата и падения уровня морских бассейнов.

Содержание песка в лёссах. Среднее содержание песка по всем хроносрезам во всех точках составляет 13.0%, медиана — 10.0%, минимум — 0.9%, максимум — 45.8%, стандартное отклонение — 10.6%, коэффициент вариации — 81.6%. Пиковое содержание песка приурочено к этапу МИС 2 в точке St, минимальная доля песка — к этапу МИС 3 в точке V8. Высокая вариация доли песка в лёссах говорит о выраженной неоднородности их состава, а значит, и условий их формирования. Проследим закономерности этой неоднородности в пространственном и временном отношениях (табл. 2).

В пространственном отношении наименьшая средняя доля песка приходится на восточное Приазовье (V4, V8, C3, YS, Sm, Chk) — от 1.5 до 4.2%. Затем по мере возрастания следуют: Сальско-Маньчское междуречье (P) — 8.1%, Азово-Кубанская равнина (An, Pt, Nr, Sb, Pm) — от 5.1 до 12.8%, северное Приазовье (Ml, Bg, Nk) — от 8 до 19.1%, Нижнее Поволжье (SA) — 13.3%, террасы нижнего Дона (Mh, Vl) — от 17.0 до 19.8%, бассейн нижнего Калуса (Dv) — 20.3%, Прикубанье (UL, Kz, Tm) — от 12.7 до 23.0%, Терско-Кумская низменность (Bd, Ot, St) — от 21.3 до 41.5%.

Представленные данные показывают, что высокая доля песка приурочена к колонкам, которые расположены в относительной близости от песчаных массивов. Верхние 10 позиций в рейтинге колонок с наибольшей средней долей песка занимают точки вблизи крупных речных долин, где и сосредоточены основные массивы песка. Чемпионом по содержанию песка является Терско-Кумская низменность. Далее следует Прикубанье, Нижний Дон и Нижняя Волга. Минимальное содержание песка в лёссах обнаруживается в колонках, удалённых от крупных речных долин, — на Азово-Кубанской низменности и в восточном Приазовье.

Во временном отношении минимальные значения средней доли песка приходятся на МИС 5е (9.8%). Далее по возрастанию следуют МИС 1 (11.9%), МИС 5 (12.3%), МИС 3 (12.5%), МИС 4 (15.1%). Максимальные значения средней доли песка приходятся на МИС 2 (16.1%). Таким образом, наблюдается связь содержания песка с климатическими вариациями. Максимальные значения этого показателя наблюдаются в криохроны, минимальные — в термохроны. Причём доля песка в целом соответствует суровости климатических условий.

Вариации доли песка намного сильнее проявляются в пространственном отношении, чем во временном. Коэффициент вариации по пространственной оси составляет 76.2%, а по временной — 17.7%, то есть на состав лёсса в среднем существенно больше влияет географическое положение (близость к песчаному источнику), чем изменчивость условий во времени.

Максимальная пространственная неоднородность по доле песка отмечена в МИС 2 и МИС 4. Стандартное отклонение составляет 12.4 и 12.7% соответственно. Минимальная неоднородность наблюдается в МИС 5е (стандартное отклонение 7.4%). Для сравнения: в голоцене этот показатель составляет 9.7%. Из этого следует, что в криохроны пространственный контраст по содержанию песка возрастал по сравнению с термохронами.

Средние темпы осадконакопления. Средние темпы аккумуляции по всем точкам и хроносредам составляют 11.1 см/1000 лет, медиана —

7.6 см/1000 лет, минимум — 2.1 см/1000 лет, максимум — 83.3 см/1000 лет, стандартное отклонение 12.1 см/1000 лет, коэффициент вариации — 109.1%. Пиковые скорости аккумуляции приходятся на этап МИС 2 в точке St, минимальные значения соответствуют этапу МИС 4 в точке Chk. В пространственном отношении наименьшие средние темпы аккумуляции приходятся на восточное Приазовье (V4, V8, C3, YS, Sm, Chk) — 4.4–5.3 см/1000 лет (таблица 3). Затем по мере возрастания следуют: северное Приазовье (Ml, Bg, Nk) — от 5.4 до 7.1 см/1000 лет, Азово-Кубанская равнина (An, Pt, Nr, Sb, Pm) — от 5.3 до 11.8 см/1000 лет, бассейн нижнего Калуса (Dv) — 11.6 см/1000 лет, Сальско-Маньчское междуречье (P) — 12.9 см/1000 лет, Прикубанье (UL, Kz, Tm) — от 8.4 до 15.3 см/1000 лет, Нижнее Поволжье (SA) — 13.6 см/1000 лет, террасы Нижнего Дона (Mh, Vl) — от 13.6 до 15.3 см/1000 лет, Терско-Кумская низменность (Bd, Ot, St) — от 20.8 до 50.3 см/1000 лет.

Представленные данные показывают, что высокие темпы аккумуляции тяготеют к песчаным массивам большой площади. С заметным отрывом по этому показателю лидирует Терско-Кумская низменность. Минимальные значения наблюдаются на территории восточного Приазовья. Однако распределение остальных мест в рейтинге темпов аккумуляции несколько отличается от распределения мест по доле песка. Так, при очень высоких значениях доли песка в Прикубанье средние темпы аккумуляции находятся на относительно невысоком уровне (четвёртое место). При этом нижнедонские лёссы, занимающие второе место, очень близки по этому показателю к прикубанским. Впечатляют темпы лёссонакопления на Терско-Кумской низменности, которые в 3 раза превышают средние темпы аккумуляции на территории, занимающей второе место (Нижний Дон).

Во временном отношении минимальные значения средних темпов аккумуляции приходятся на МИС 5 (6.5 см/1000 лет). Далее по возрастанию следуют МИС 5е (7.6 см/1000 лет), МИС 3 (8.7 см/1000 лет), МИС 1 (8.9 см/1000 лет), МИС 4 (13.0 см/1000 лет), МИС 2 (21.1 см/1000 лет). То есть максимальные значения средних темпов аккумуляции приходятся на криохроны, а минимальные — на термохроны.

Вариации темпов осадконакопления сильнее проявляются в пространственном отношении, чем во временном. Коэффициент вариации этого параметра по пространственной оси составляет 85.3%, а по временной — 50.3%. Иначе говоря, скорость накопления минеральной пыли больше зависит от географического положения территории (близость к источнику), чем от изменчивости климатических условий во времени. Однако вли-

Таблица 3. Средние темпы осадконакопления (в см/1000 лет) для лёссовых и палеопочвенных горизонтов, соответствующих основным климатостратиграфическим подразделениям верхнего плейстоцена и голоцена

Индекс горной выработки	Голоценовая почва/МИС 1	Алтыново-деснинский лёсс/МИС 2	Брянская палеопочва/МИС 3	Хотылёвский лёсс/МИС 4	Мезинский педокомплекс/МИС 5	Салынская палеопочва/МИС 5е
Ys	5.7	6.7	3.0	4.1	3.5	6.7
An	5.7	7.7	5.0	4.3	4.6	4.7
Sb	8.6	10.7	3.6	10.0	7.6	11.3
Pm	5.7	26.7	8.6	14.3	7.8	8.0
Ot	11.4	53.3	10.0	23.6	11.9	14.7
Bg	7.5	9.7	7.1	7.9	5.3	5.3
V4	5.7	10.0	2.3	6.4	2.2	5.3
V8	6.4	6.7	3.2	3.6	4.0	4.7
C3	6.4	6.7	3.2	2.9	3.2	4.0
UL	10.7	18.0	10.7	6.4	6.1	10.7
Nk	6.4	9.3	5.7	6.4	4.4	6.0
Chk	6.4	5.3	3.9	2.1	3.1	4.7
MI	5.0	7.3	5.0	6.4	3.2	5.3
Sm	7.1	8.0	4.6	3.6	3.4	4.7
VI	14.3	26.7	12.5	10.7	14.4	13.3
Np	10.7	16.7	8.9	7.1	8.5	10.0
Bd	14.3	73.3	21.4	35.7	15.3	—
Dv	10.7	23.3	8.9	10.7	7.6	8.3
St	17.9	83.3	28.6	71.4	—	—
Pt	9.3	11.3	7.9	11.4	7.1	6.7
P	10.0	28.0	8.6	10.7	8.8	11.3
Kz	5.7	14.7	11.4	5.0	6.1	7.3
Mh	9.3	23.3	17.9	14.3	6.8	10.0
Tm	13.6	26.7	5.7	—	—	—
SA	—	—	—	32.1	5.3	3.3

яние изменчивости климатических условий на темпы осадконакопления заметно выше, чем влияние этого фактора на содержание песка. Таким образом, темпы осадконакопления, вероятно, лучше отражают климатическую изменчивость, чем песчаный индикатор.

Максимальная пространственная неоднородность (контраст) по скорости осадконакопления достигался в МИС 2 и МИС 4 — стандартные отклонения составляют 20.7 и 15.2 см/1000 лет соответственно. Минимальная неоднородность про-

слеживается в МИС 5е (стандартное отклонение — 3.2 см/1000 лет) и МИС 1 (3.5 см/1000 лет). Таким образом, в криохроны значительно возрос пространственный контраст темпов осадконакопления по сравнению с термохронами.

ФАКТОРЫ, ИСТОЧНИКИ И НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА МИНЕРАЛЬНОЙ ПЫЛИ

Проведённый анализ показывает, что главным фактором вариации содержания песка и темпов

осадконакопления в ЛПС Предкавказья на протяжении всего позднего плейстоцена и голоцена оставалось географическое положение. Области распространения песчаных и супесчаных отложений, привязаны к долинам крупнейших рек региона (Терек, Кума, Волга, Дон, Кубань). Участки лёссового покрова, расположенные вблизи этих областей, отличаются повышенным содержанием песчаной фракции и повышенными скоростями лёссонакопления. Всё это указывает на то, что нижние звенья крупных флювиальных систем являются основными источниками минеральной пыли в регионе, то есть областями сноса или питающими провинциями.

Среди всех источников резко выделяется Прикаспийская низменность с огромными по площади массивами аллювиальных песков и супесей Терека, Кумы и Волги. Древние дельты и палеорула этих рек стали территориями развития эолового рельефа — дюнных полей и грядовых песков [9]. Лёссы Терско-Кумской низменности, примыкающие непосредственно к юго-западной окраине Прикаспийской низменности, отличаются экстремально высокими показателями мощности и содержания песка. Причём эти показатели убывают в западном направлении, по мере удаления от источника [36]. Этот главный тренд в лёссах Предкавказья, направленный с востока на запад, отчётливо прослеживается для всех хроносрезов (табл. 3). Наблюдения за современными пылевыми бурями показывают, что Прикаспийская низменность и сегодня остаётся основным источником минеральной пыли в Предкавказье [9, 22].

Лёссовые ареалы, примыкающие к долинам Дона и Кубани, выделяются на общем фоне высоким содержанием песка и несколько повышенными мощностями. Заметное влияние этих рек на состав и мощность лёссового покрова распространяется на первые десятки километров от речных долин, не превышая 50 км. Эти особенности указывают на то, что донская и кубанская питающие провинции имеют важное, но второстепенное для региона значение с точки зрения объёмов продуцируемой минеральной пыли. Их влияние лишь немного искажает главный региональный тренд — перенос с востока на запад. Относительно небольшой вклад этих источников показывает, что объёмы сноса минеральной пыли тесно связаны с площадями слабозакреплённых песчаных и супесчаных грунтов, содержащих мобилизованный для дефляции материал.

Важными факторами, влияющими на объём и состав аккумулируемой минеральной пыли, являются направление и сила приземного ветра. В современных климатических условиях для западного Прикаспия характерно преобладание ветров восточных румбов, особенно в холодный

сезон. Сочетаясь с осенними и весенними засухами, сильные восточные ветры провоцируют мощные пылевые бури, переносящие минеральную пыль далеко на запад вплоть до Азовского моря [9, 22]. Как показывают результаты численного моделирования, общая схема атмосферной циркуляции в регионе принципиально не менялась на протяжении последних 130 тыс. лет. Однако скорость ветров восточных румбов в эпоху последнего ледникового максимума (ПЛМ, ~21 тыс. л.н.) была, согласно модели INM-CM48, несколько выше современной. Это согласуется с наблюдаемым экстремумом содержания песка в лёссах Терско-Кумской низменности, относимых к МИС 2.

По данным эксперимента на модели INM-CM48, в эпоху последнего ледникового максимума в Прикаспии и Средней Азии нарастали засушливость климата и площадь источников минеральной пыли. Наши результаты свидетельствуют, что максимальные темпы осадконакопления практически во всех колонках приходились как раз на МИС 2. Особенно ярко это проявилось в лёссах Терско-Кумской низменности, где темпы осадконакопления выросли в 3–6 раз по сравнению с предыдущей эпохой. Для МИС 2 характерен также наивысший контраст условий между востоком и западом Предкавказья среди всех рассматриваемых этапов. Минимальные темпы осадконакопления, по нашим данным, пришлись на межледниковые этапы (МИС 1 и МИС 5), которым отвечают относительно тёплые и влажные климатические условия [18, 37]. Содержание песка хотя и согласуется с общим ходом изменений темпов осадконакопления, но значительно слабее реагирует на изменчивость условий во времени. Таким образом, усиление засушливости климата можно принять в качестве главного фактора, определяющего изменение средних темпов аккумуляции пыли во времени. Засушливость прямо влияет на изменение площадей активных источников, а, следовательно, на общие объёмы транспорта и аккумуляции минеральной пыли.

Изменение уровня морских бассейнов могло сильно влиять на площади источников минеральной пыли в Предкавказье. Так глубокая ательская регрессия в МИС 3–4 [38], вероятно, привела к существенному увеличению площади источников в Прикаспии. Возможно, что именно наложение двух факторов (засушливого климата и низкого уровня моря) в конце МИС 3 — начале МИС 2 привело к экстремально высоким скоростям накопления минеральной пыли в Терско-Кумской низменности. А крупнейшая хвалынская трансгрессия в конце МИС 2 — начале МИС 1 [28], наоборот, могла существенно сократить площади источников, снизив продукцию пыли. Колебания уровня Черноморского бассейна также, вероятно, сказались на площади источников. Так, высо-

кое содержание песка в лёссах Нижнего Прикубанья (точка UL) в МИС 4 и МИС 2 может быть связано с чередой глубоких регрессий Чёрного моря — посткарангатской и новоэвксинской [39]. В результате регрессии моря в низовьях Кубани была осушена обширная аллювиальная равнина и сформированы молодые террасы, что резко увеличило площадь локальных источников минеральной пыли.

Подводя итоги анализа процессов лёссонакопления на юге Европейской России, можно сформулировать следующие выводы.

1. Доминирующим источником минеральной пыли для территории Предкавказья на протяжении последних 130 тыс. лет была и остаётся Прикаспийская низменность. Массивы песчаных и супесчаных отложений, сформированные аллювием Терека, Кумы и Волги, в условиях аридного климата развеиваются сильными восточными ветрами, и массы минеральной пыли переносятся далеко на запад вплоть до Азовского моря. Содержание песчаной фракции в лёссах и средние скорости лёссонакопления закономерно уменьшаются с востока на запад — от Терско-Кумской низменности до Приазовья.

2. Террасы и аллювиальные приустьевые равнины Дона и Кубани являются второстепенными источниками минеральной пыли, увеличивая содержание песчаной фракции в лёссах и темпы лёссонакопления на прилегающих к долинам территориях.

3. Засушливость климата — главный фактор, изменявший темпы лёссонакопления в Предкавказье на протяжении позднего плейстоцена и голоцена. Рост аридизации в криохроны провоцировал расширение площади источников пыли за счёт деградации растительного покрова и иссушения субстрата. Увеличение объёмов продукции минеральной пыли в областях дефляции влекло за собой повышение темпов осадконакопления в областях аккумуляции. В криохроны МИС 4 и МИС 2 средние темпы лёссонакопления в 1.5 и 2.5 раза соответственно превышали средние темпы, установленные для термохронов (МИС 5, МИС 3 и МИС 1).

4. В лёссовых горизонтах, отвечающих криохронам (МИС 4 и МИС 2), содержание песка в среднем в 1.3 раза выше, чем в почвах термохронов (МИС 5, МИС 3 и МИС 1). Увеличение доли песчаной фракции в криохроны объясняется расширением площади источников минеральной пыли и наибольшим ростом скоростей приземного ветра. Согласно модельным расчётам, общая схема атмосферной циркуляции в криохроны не изменялась.

5. Колебание уровня Каспийского и Азово-Черноморского морских бассейнов в позднем плейстоцене и голоцене оказывало существенное влияние на изменение площади источников минеральной пыли и, как следствие, на темпы лёссонакопления в областях аккумуляции.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование строения, состава и возраста лёссовых отложений Предкавказья выполнено при поддержке проекта РНФ 21-77-10104. Исследование распространения эоловых песков выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119021990092-1 (FMWS-2019-0008).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pye K.* The nature, origin and accumulation of loess // *Quaternary Science Reviews*. 1995. V. 14 (7–8). P. 653–667.
2. *Muhs D.R.* The geologic records of dust in the Quaternary // *Aeolian Research*. 2013. V. 9. P. 3–48.
3. *Li Y., Shi W., Aydin A. et al.* Loess genesis and worldwide distribution // *Earth-Science Reviews*. 2020. V. 201. P. 102947.
4. *Балаев Л.Г., Царёв П.В.* Лёссовые породы Центрального и Восточного Предкавказья. М.: Наука, 1964.
5. *Haase D., Fink J., Haase G. et al.* Loess in Europe — its spatial distribution based on a European Loess Map, scale 1:2.500.000 // *Quaternary Science Review*. 2007. V. 26 (9–10). P. 1301–1312.
6. *Astakhov V., Pestova L., Shkatova V.* Loessoids of Russia: Varieties and distribution // *Quaternary International*. 2021 (In Press). <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.005>
7. *Velichko A.A., Morozova T.D., Borisova O.K. et al.* Development of the steppe zone in southern Russia based on the reconstruction from the loess-soil formation in the Don-Azov Region // *Doklady Earth Sciences*. 2012. V. 445 (2). P. 999–1002.
8. Опорные инженерно-геологические разрезы лёссовых пород Северной Евразии: монография / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Книжный дом “Университет”, 2008.
9. *Федорович Б.А.* Вопросы происхождения лёсса в связи с условиями его распространения в Евразии // Труды Ин-та геогр. АН СССР. 1960. Т. 80. С. 96–117.
10. *Rozyski S.Z.* Loess and Loess-Like Deposits. Wrocław: Ossolineum: Polish Academy of Sciences, 1991.
11. *Költringer C., Stevens T., Lindner M. et al.* Quaternary sediment sources and loess transport pathways in the Black Sea — Caspian Sea region identified by detrital zircon U-Pb geochronology // *Global and Planetary Change*. 2022. V. 209. 103736. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103736>
12. *Болховская Н.С.* Эволюция лёссово-почвенной формации Северной Евразии. М.: Изд-во МГУ, 1995.

13. Porter C. Chinese loess record of monsoon climate during the last glacial-interglacial cycle // *Earth—Science Review*. 2001. V. 54 (1–3). P. 115–128.
14. Smith G.D. Illinois loess – Variations in its properties and distribution // *Illinois Agricultural Experiment Station Bulletin*. 1942. V. 490. P. 139–184.
15. Frechen M., Oches E.A., Kohfeld K.E. Loess in Europe – mass accumulation rates during the Last Glacial Period // *Quaternary Science Review*. 2003. V. 22 (18–19). P. 1835–1857.
16. Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposit. London: Academic Press, 1987.
17. Konstantinov E.A., Velichko A.A., Kurbanov R.N. et al. Middle to Late Pleistocene topography evolution of the North-Eastern Azov region // *Quaternary International*. 2018. V. 465. P. 72–84.
18. Величко А.А., Борисова О.К., Захаров А.Л. и др. Смена ландшафтных обстановок на юге Русской равнины в позднем плейстоцене по результатам исследования лёссово-почвенной серии Приазовья // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2017а. №1. С. 74–83.
19. Величко А.А., Янг Т., Алексеев А.О. и др. Сравнительный анализ изменений условий осадконакопления за последний межледниково-ледниковый макроцикл в лёссовых областях юга Восточно-Европейской равнины (Приазовье) и центрального Китая (Лёссовое плато) // *Геоморфология*. 2017б. № 1. С. 3–18.
20. Chen J., Yang T., Matishov G.G. et al. A luminescence dating study of loess deposits from the Beglitsa section in the Sea of Azov, Russia // *Quaternary International*. 2018а. V. 478. P. 27–37.
21. Chen J., Yang T., Matishov G.G. et al. Luminescence chronology and age model application for the upper part of the Chumbur-Kosa loess sequence in the Sea of Azov, Russia // *Journal of Mountain Science*. 2018b. V. 15. P. 504–518.
22. Mazneva E., Konstantinov E., Zakharov A. et al. Middle and Late Pleistocene loess of the Western Ciscaucasia: Stratigraphy, lithology and composition // *Quaternary International*. 2021. V. 590. P. 146–163.
23. Сычёв Н.В., Константинов Е.А., Захаров А.Л. и др. Новые данные по геохронологии верхнечетвертичных лёссов Терско-Кумской низменности // *Литология и полезные ископаемые*. 2022 (в печати).
24. Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records // *Paleoceanography*. 2005. V. 20 (2). PA1003.
25. Stevens T., Buylaert J.P., Thiel C. et al. Ice-volume-forced erosion of the Chinese Loess Plateau global Quaternary stratotype site // *Nature communications*. 2018. V. 9 (1). P. 1–12.
26. Захаров А.Л., Константинов Е.А. Строение крупных западин лёссовых междуречий восточного Приазовья (на примере Червоной Пади) // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2019. № 4. С. 85–96.
27. Константинов Е.А. Эволюция рельефа Северо-Восточного Приазовья в плейстоцене: по материалам изучения лёссово-почвенной формации. Автореф. дис. канд. геогр. наук. М., 2013.
28. Kurbanov R., Murray A., Thompson W. et al. First reliable chronology for the Early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley // *Boreas*. 2021. V. 50 (1). P. 134–146.
29. Карта четвертичных образований. Масштаб 1:1000000. Первое издание. Лист L (3637). “ВСЕГЕИ”, “Госгеолкарта СССР”. 1986.
30. Карта четвертичных образований. Масштаб 1: 1000000. Первое издание. Лист L (3738). М.: ВСЕГЕИ, МПР РФ, Аэрогеология, 2000.
31. Карта четвертичных образований. Масштаб 1: 1000000. Первое издание. Лист L (3839). М.: ВСЕГЕИ, Роскомнедра, Аэрогеология, 1993.
32. Карта четвертичных образований. Масштаб 1: 1000000. Первое издание. Лист М (38)39. М.: ВСЕГЕИ, Госгеолкарта, 1988.
33. Карта четвертичных образований. Масштаб 1: 1000000. Первое издание. Лист М (37)38. М.: ВСЕГЕИ, МПР РФ, Аэрогеология, 2001.
34. Сафронов И.Н. Геоморфология Северного Кавказа и Нижнего Дона. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1987.
35. Svitoch A.A., Makshaev R.R. Incompleteness of the geological record in Middle-Upper Pleistocene key sections of the Northern Caspian Lowland // *Quaternary International*. 2020. V. 540. P. 78–96.
36. Константинов Е.А., Мазнева Е.А., Сычёв Н.В. и др. Закономерности пространственной изменчивости позднеплейстоценовых и голоценовых лёссов Предкавказья // *География и природные ресурсы*. 2020. № 3. С. 98–107.
37. Velichko A.A., Catto N.R., Kononov M.Y. et al. Progressively cooler, drier interglacials in southern Russia through the Quaternary: Evidence from the Sea of Azov region // *Quaternary International*. 2009. V. 198 (1–2). P. 204–219.
38. Yanina T., Bolikhovskaya N., Sorokin V. et al. Paleogeography of the Atelian regression in the Caspian Sea (based on drilling data) // *Quaternary International*. 2021. V. 590. P. 73–84.
39. Yanina T.A. The Ponto-Caspian region: environmental consequences of climate change during the Late Pleistocene // *Quaternary International*. 2014. V. 345. P. 88–99.