



ПОЧВЕННЫЕ КАРБОНАТЫ - СТОК И ИСТОЧНИК УГЛЕКИСЛОТЫ РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ПОВЕДЕНИЯ КАРБОНАТОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА-АТМОСФЕРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

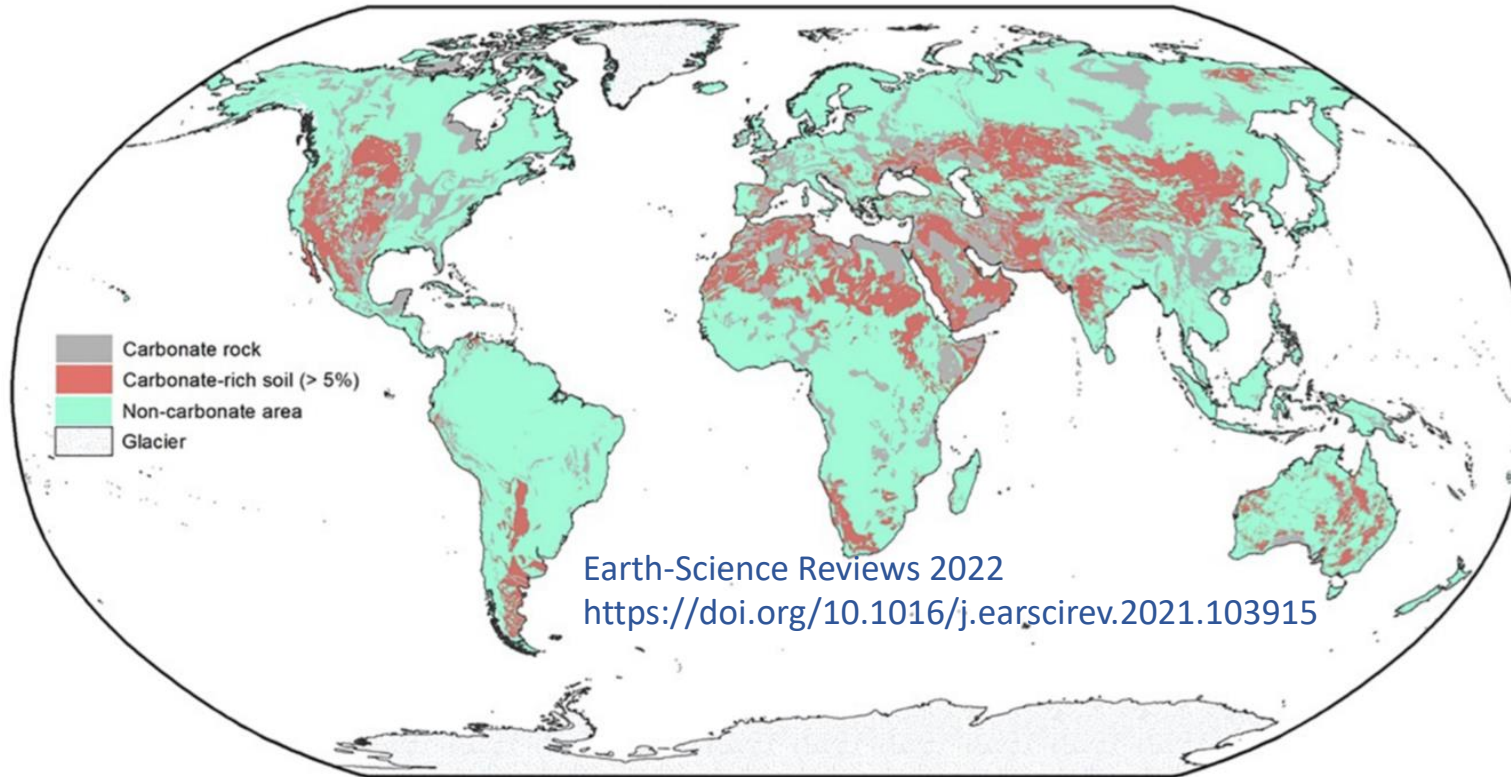
Алексеев А.О., Кудеяров В.Н.



**Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
(ФИЦ ПНЦБИ РАН), Пущино, Московская область**

- Одним из основных продуцентов двуокиси углерода в биосфере является почвенная оболочка Земли.
- Одновременно почвы представляют собой значительный буферный резервуар органического и неорганического углерода. Карбонаты твердой и жидкой фаз находятся в состоянии динамического равновесия с углекислотой почвенной атмосферы и могут в зависимости от условий аккумулировать или отдавать углекислый газ в почвенный воздух, регулировать газовый обмен почвы с атмосферой и другими геосферами. Таким образом нивелируются природные и антропогенные флуктуации состава атмосферы.
- Основное внимание исследователей в данном аспекте уделяется изучению органического вещества .
- Основная часть исследований влияния повышенного уровня атмосферного CO_2 на почвенные процессы по всему миру (Jones et al., 2014) сосредоточены на запасах органического углерода в почве.
- При этом немаловажную роль могут играть неорганические компоненты почв, значение которых в расчетах планетарных потоков и резервуаров углерода часто недоучитывается.
- Влияние повышенного содержания CO_2 в атмосфере конкретно на неорганический углерод в почве – на педогенные, биогенные или литогенные карбонаты – главным образом в форме $CaCO_3$ исследуется слабо.

Глобальное распределение карбонатных пород и богатых карбонатами почв (карбонат > 5%)



По сравнению с **1500 Мкг** органического углерода в верхнем 1 м (МГЭИК, 2014), почвы содержат **700-750 Мкг** неорганического углерода в слое до 1 м (Batjes, 1996 – в основном в полусухих и аридных районах (7,49·10⁹ га; около **54%** поверхности суши в мире).

Шлезингер (Schlesinger, 1985) оценивает запасы неорганического углерода аридных почв мира в 10¹⁵ кг, а ежегодный поток из атмосферы в этот резервуар – 1-2 × 10¹⁰ кг С/год.

Запасы карбонатов велики и могут соперничать с запасами органического углерода.

Их актуальность возрастает в сравнении с органическим С, поскольку они имеют среднее время пребывания почве превышающее тысячелетия (Schlesinger, 1985; Zamanian et al., 2016), однако их небольшая скорость образования делает этот пул неактуальным в масштабе десятилетий или столетий.

Почвенные карбонаты (или почвенный неорганический углерод, SIC) можно разделить на два типа: литогенный или первично-педогенные или вторичные (Salomons and Mook 1976). Педогенные карбонаты образуются при трансформации (растворение) литогенных карбонатов (реликтовые морские известняки), обменивая их C на CO₂, полученный из биологических источников (разложение органических веществ и корневое дыхание), и переосаждаются как CaCO₃ в почве (Cerling 1984; Nordt et al. 1996; Landi et al. 2003; Kuzyakov et al. 2006; Gocke et al. 2011).



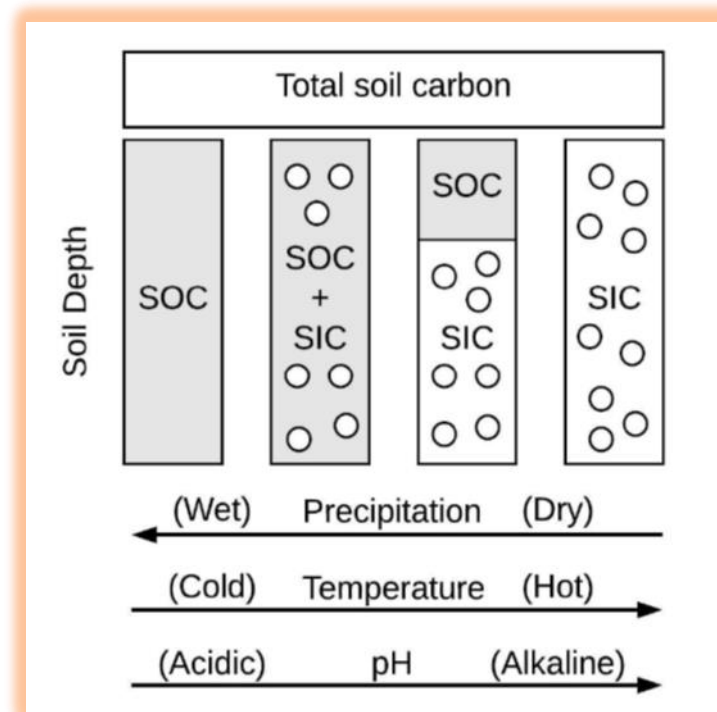
Считается, что только 80% ассимилированного почвой углерода возвращается в атмосферу, а около 20% связывается органическим веществом и карбонатами. Исчерпывающей количественной оценки роли карбонатной системы почв в судьбе педогенной CO₂ пока не произведено.

Дискуссионным и требующим дальнейшей разработки является вопрос о прогнозе поведения карбонатов в системе почва-атмосфера для различных сценариев глобального изменения климата. В его решении весьма информативным представляется ретроспективный анализ закономерностей вековой динамики запасов и профильного распределения педогенных карбонатов в связи с изменчивостью природных условий на протяжении исторического времени (последние несколько тысяч лет).

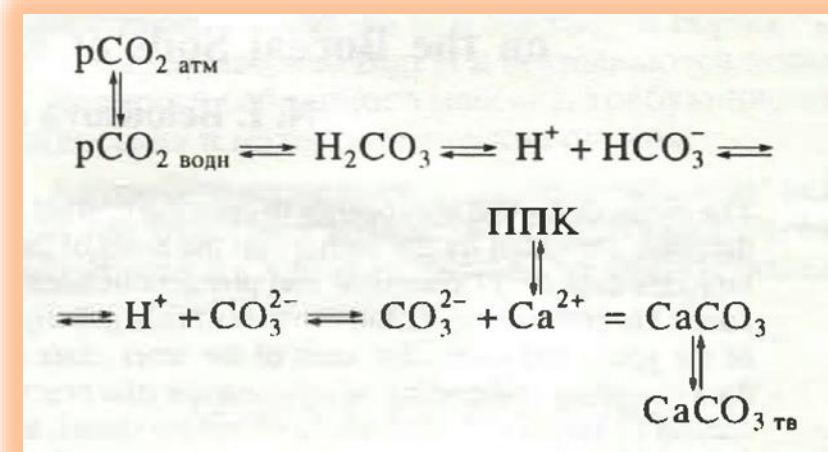
Известно, что в процессе почвообразования происходит накопление, профильное перераспределение и вынос углекислых солей кальция. Направленность и скорость миграции CaCO_3 определяется различными условиями и факторами, в том числе климатом, литологией пород, дренированностью территории, уровнем залегания грунтовых вод.

Их сочетание в ту или иную историческую эпоху формирует определенный тип карбонатного профиля, являющийся генетическим показателем состояния почв.

К основным его характеристикам относятся глубина вскипания, формы и количество новообразований CaCO_3 , глубина залегания и мощность зоны аккумуляции карбонатов, содержание и запасы CaCO_3



Реакция формирования карбоната кальция в почве



Недавние исследования показывают, что карбонаты могут быть вовлечены в краткосрочные биологические циклы C гораздо более быстрыми темпами, чем ожидалось:

1) МРТ содержания C в педогенном CaCO_3 , вероятно, намного короче, чем предполагалось первоначально ($\approx 78\,000$ лет, Шлезингер, 1985), и колеблется в пределах нескольких тысяч лет (Kuzyakov et al., 2006; Gocke et al., 2011).

2) Вымывание катионов из-за несколько более высокой влажности почвы и (значительно) более высокой концентрации катионов в почвенном растворе (Karberg et al., 2005) при воздействии $e\text{CO}_2$ приводит к удалению Ca^{2+} и Mg^{2+} (Siemens et al., 2012; Williams et al., 2003), который влияет на CaCO_3 и равновесный выброс CO_2 в атмосферу (Шлезингер, 2017).

3) Сильное увеличение ризосферных отложения, включая высвобождение органических кислот при воздействии $e\text{CO}_2$, приведет к подкислению почвы и выделению CO_2 из CaCO_3 .

4) Более высокое внесение удобрений N и фиксация N_2 бобовыми ускорит подкисление почвы во всем мире (Zamanian et al., 2018).

Это, вероятно, приведет к смещению равновесия CaCO_3 в сторону выброса CO_2 в атмосферу (Zamanian and Kuzyakov, 2019).!!!

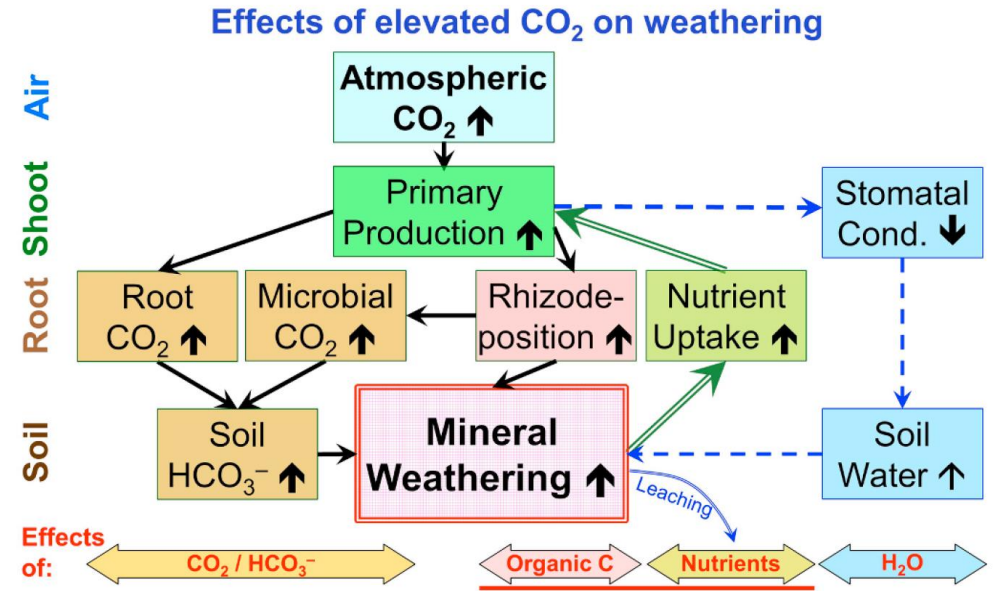


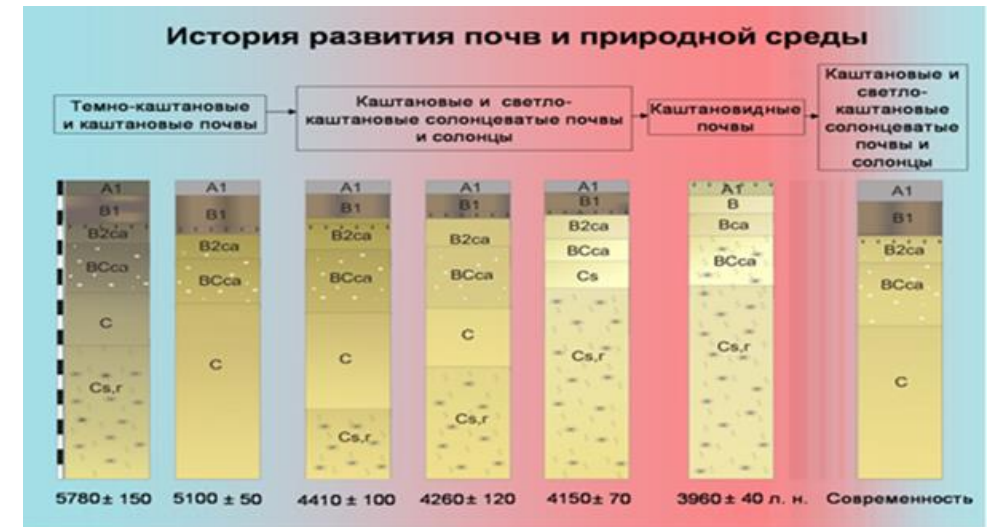
Fig. 5. Conceptual diagram of relationships between elevated atmospheric CO_2 (Atmospheric $\text{CO}_2 \uparrow$) and the rate and extent of mineral weathering in soil.

Следует учитывать процессы, переводящие большие запасы карбонатов в биотические циклы углерода, поскольку такие эффекты, хотя и обусловлены естественными процессами, хорошо известны в истории Земли, например, в период между плейстоценом и голоценом, когда из карбонатов было выделено около 400–500 Pg C за короткий период сильно усилилось глобальное потепление (Adams and Post, 1999).

- Изучение временной динамики карбонатов возможно осуществить несколькими различными способами. Один из них - ежегодное измерение содержания и запасов карбонатов стационарными методами. Однако при всей заманчивости подобного подхода следует отметить, что он очень трудоемок и требует много времени, так как для оценки временной динамики требуется как минимум трехлетний срок наблюдений и многократная повторность.

- Но даже трехлетний срок наблюдений не дает точной картины годовой динамики, поскольку может совпасть с рядом экстремальных по погодным условиям лет.

- Гораздо более надежным подходом представляется изучение вековой динамики, когда результаты не зависят от конкретных погодных условий года и характеризуют определенную многолетнюю тенденцию.

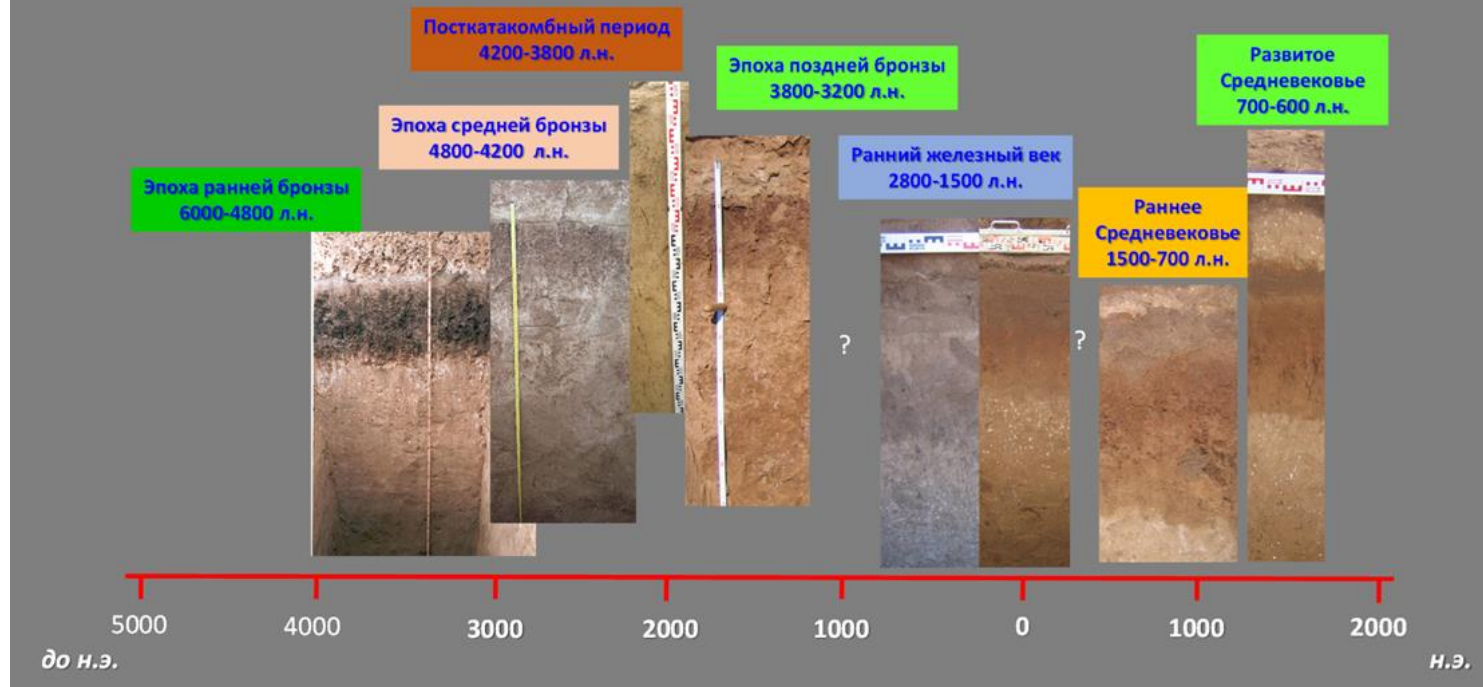


Палеопочвы и почвенные покровы исторического времени

Начиная с 70-х годов прошлого столетия в ИФХ и БТПП РАН широкое распространение получили палеопочвенные исследования различных археологических и исторических памятников позднего голоцена (И.В. Иванов, В.А. Демкин, Рысков Я.Г. Хохлова О.С., Алексеев А.О. Алексеева Т.В., Борисов А. В., Калинин П. И., и многие другие)

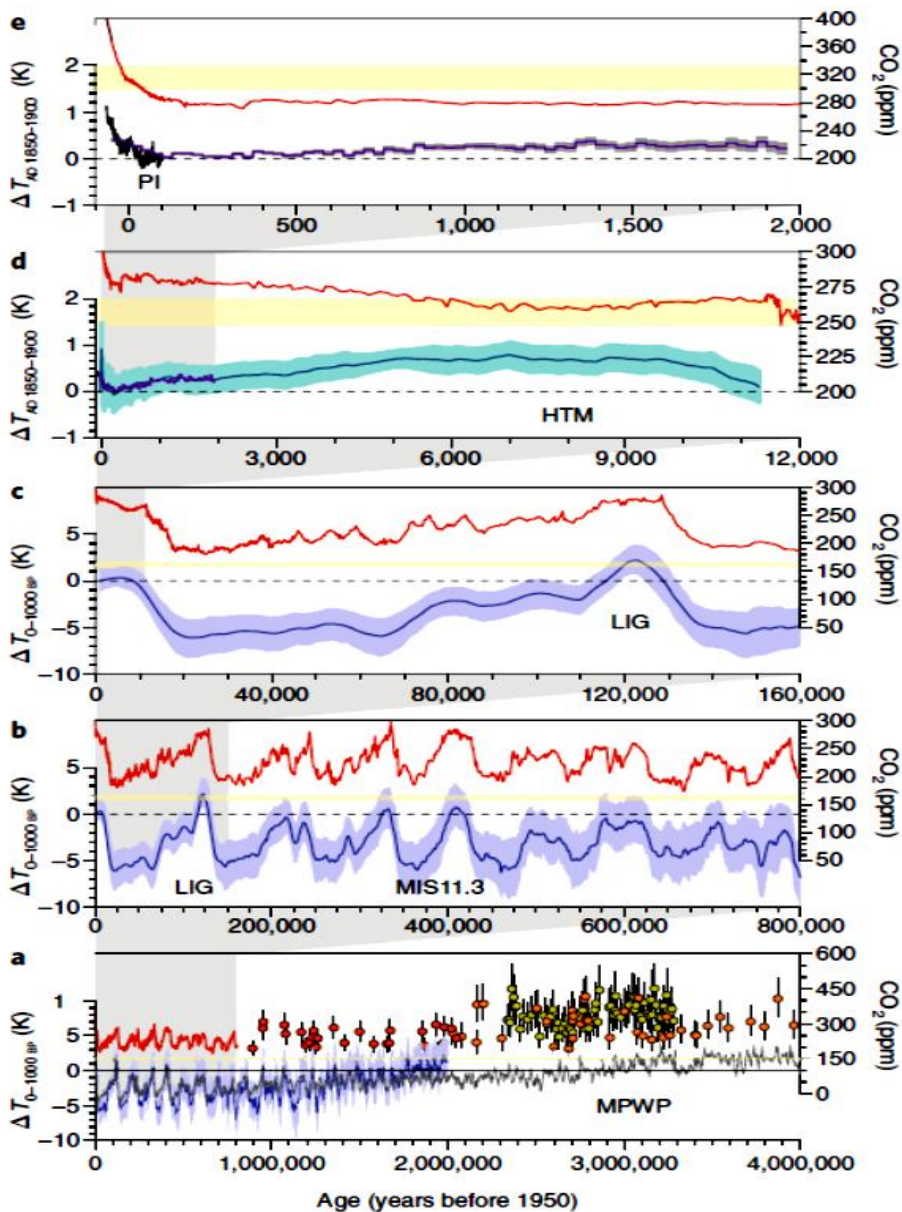


Этапы эволюции почв степной зоны



Изучение временной динамики карбонатов проводилась и продолжается в Институте на примере палеопочв разновозрастных археологических памятников (курганов) и современных фоновых почв.

Важен масштаб времени !!!



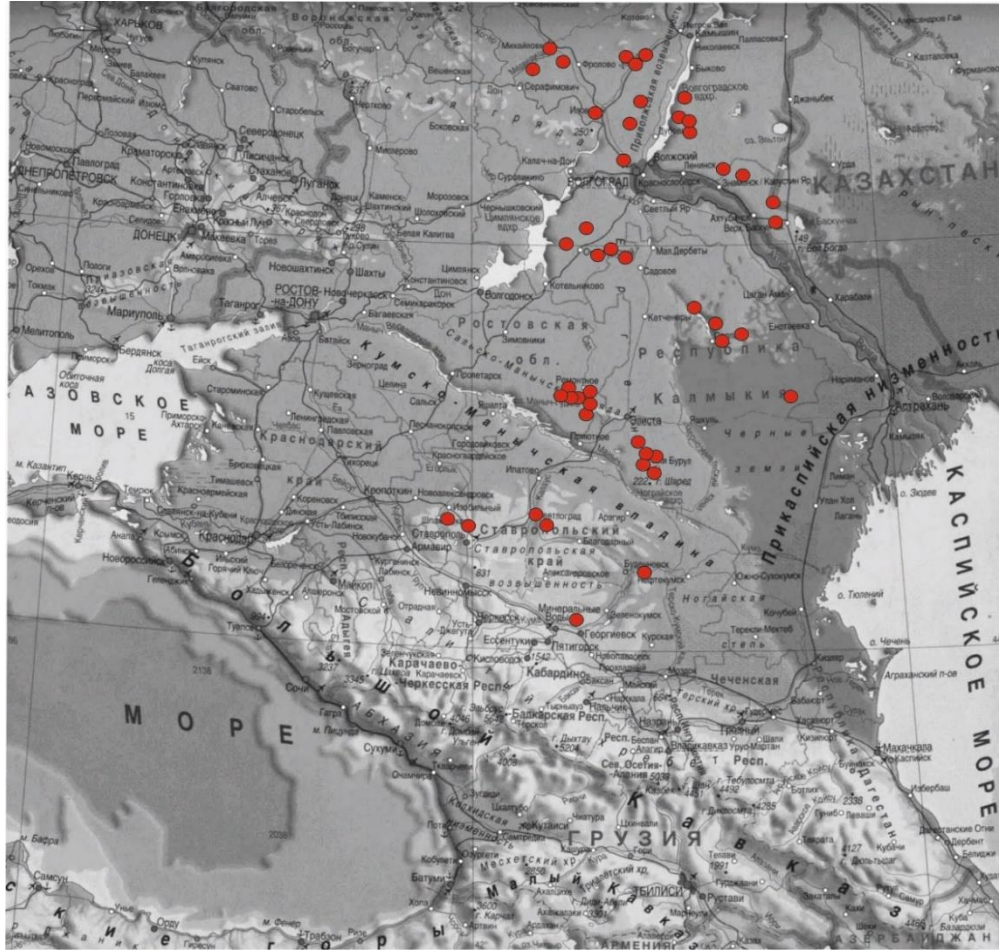
Климат менялся постоянно... Почему не сейчас?

Без анализа роли естественной тенденции изменения климата и ее влияния на почвы и ландшафты невозможно предсказать долгосрочные последствия геоэкологических изменений.

Реакция степных экосистем юга Европейской части России на разномасштабные изменения климата в прошлом (плейстоцен - голоцен) может быть использована как основа для оценки тренда предстоящих перестроек в состоянии естественных и агро-ландшафтов степной зоны.

Особое значение имеет прогнозная оценка изменений свойств черноземов и каштановых почв как основы продовольственной безопасности Российской Федерации.

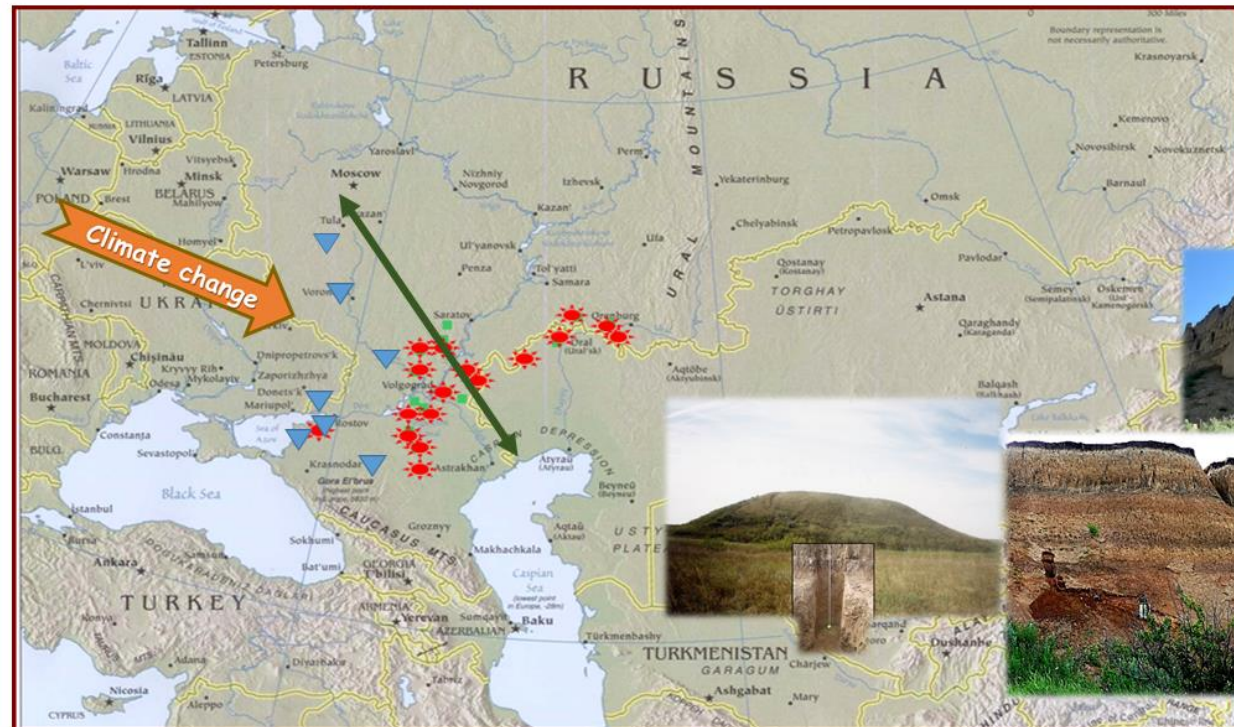
Современные ландшафты степной зоны Европейской части России отражают длительную историю естественной эволюции, которая отличалась сложностью и динамичностью вследствие изменений природных условий и возрастающего воздействия антропогенного фактора.



два типа «временных капсул» четвертичного времени хранящих информацию о палеоэкосистемах и палеоклиматах:

Во-первых, это лессово-почвенные комплексы позднего плейстоцена (▼),

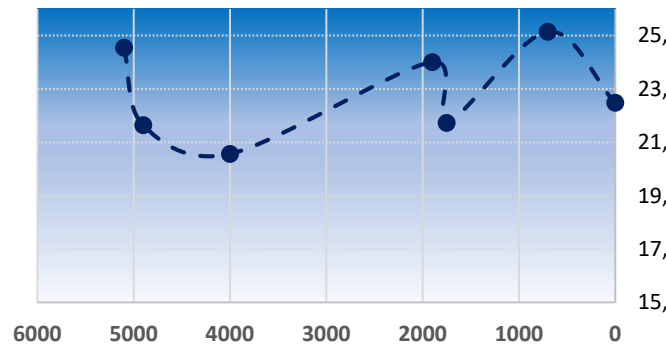
во-вторых, это многочисленные голоценовые палеопочвы археологических памятников (★).



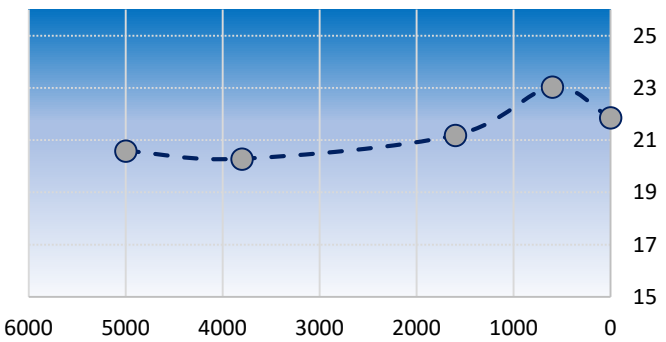
Расположение курганных могильников, в пределах которых исследованы погребенные почвы

Изменения аридности последних 5000 лет

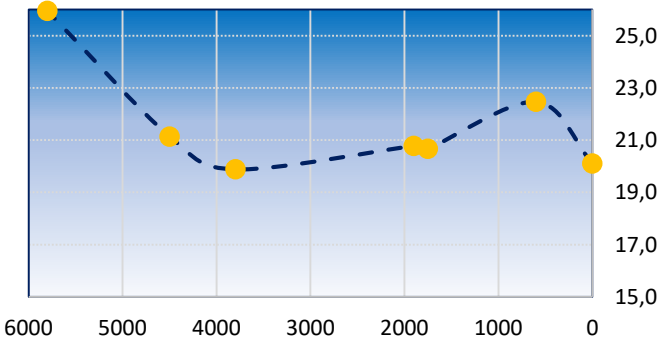
Авиловский



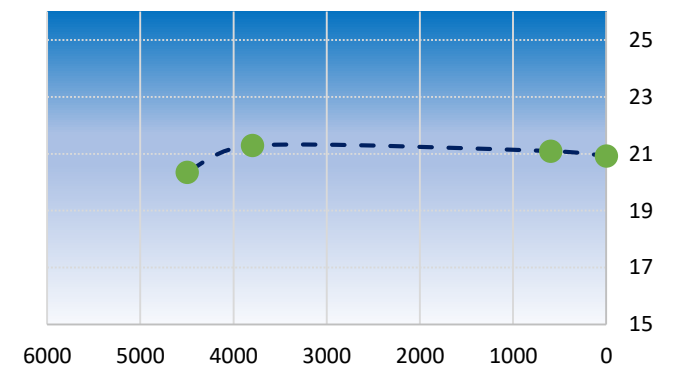
Абганерово



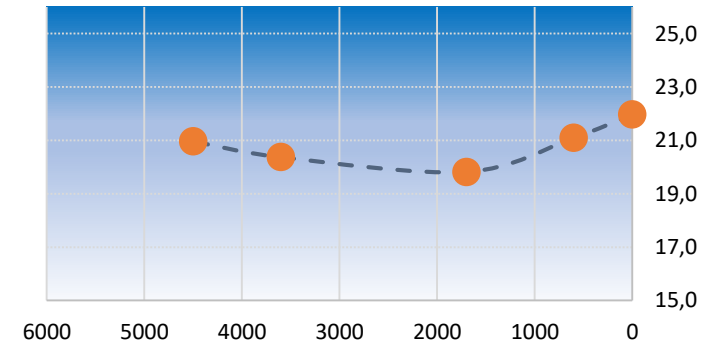
Перегрузное



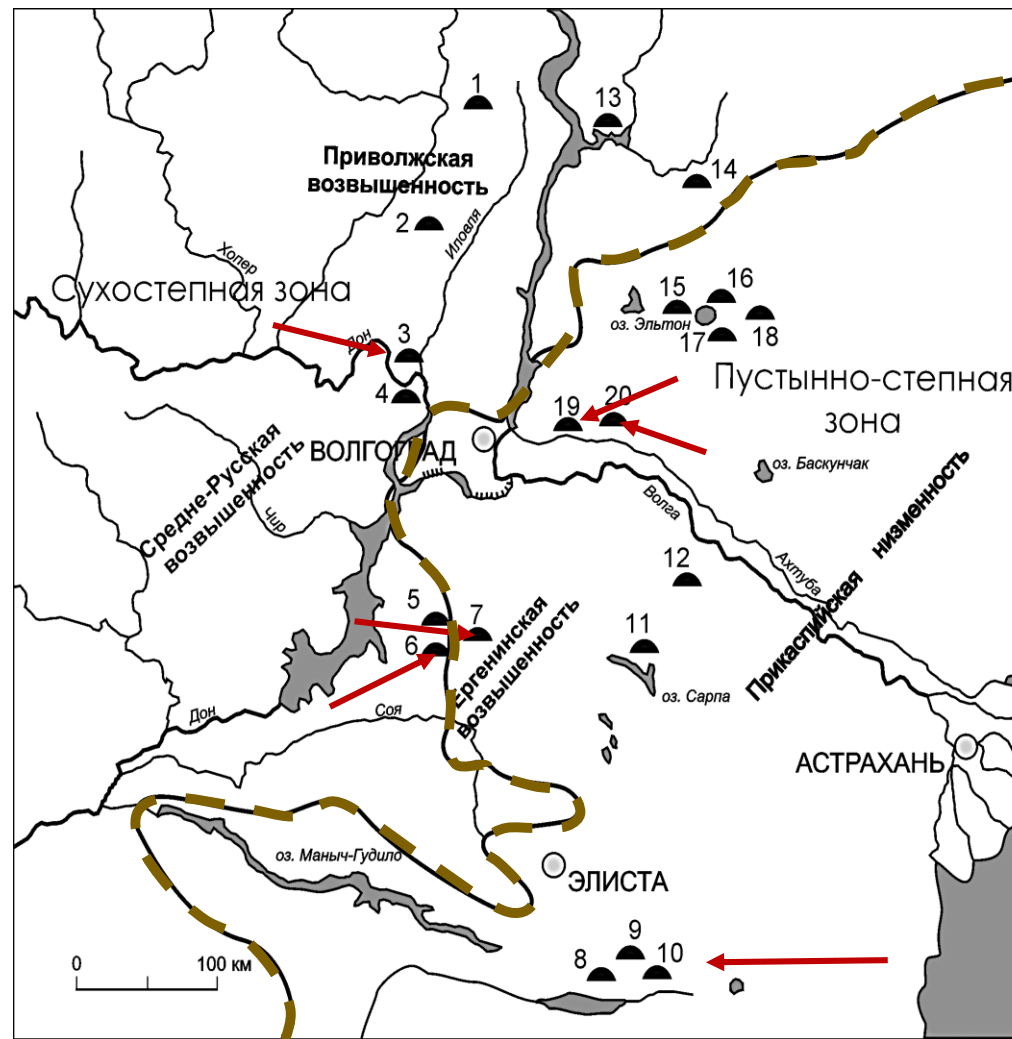
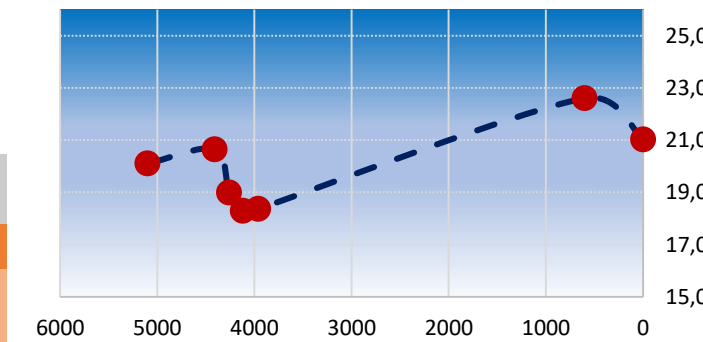
Бахтияровка



Малаяевка



Калмыкия



Условные обозначения:

● Объекты исследования



Курганные могильники: 1 - "Линево"; 2 - "Неткачево"; 3 - "А-5"; 4 - "Акса́й"; 5 - "Акса́й"; 6 - "Перегрузное"; 7 - "Абганерово"; 8 - "Зунда-1"; 9 - "Зунда-2"; 10 - "Зунда-3"; 11 - "Цаган-Нур"; 12 - "Джангар"; 13 - "Белокаменка"; 14 - "Ченин"; 15 - "Эльтон, Приозерное"; 16 - "Венгилевка"; 17 - "Венгилевка"; 18 - "Ченин";

IDM

<10

10≤IDM≤20

20<IDM≤24

24<IDM≤28

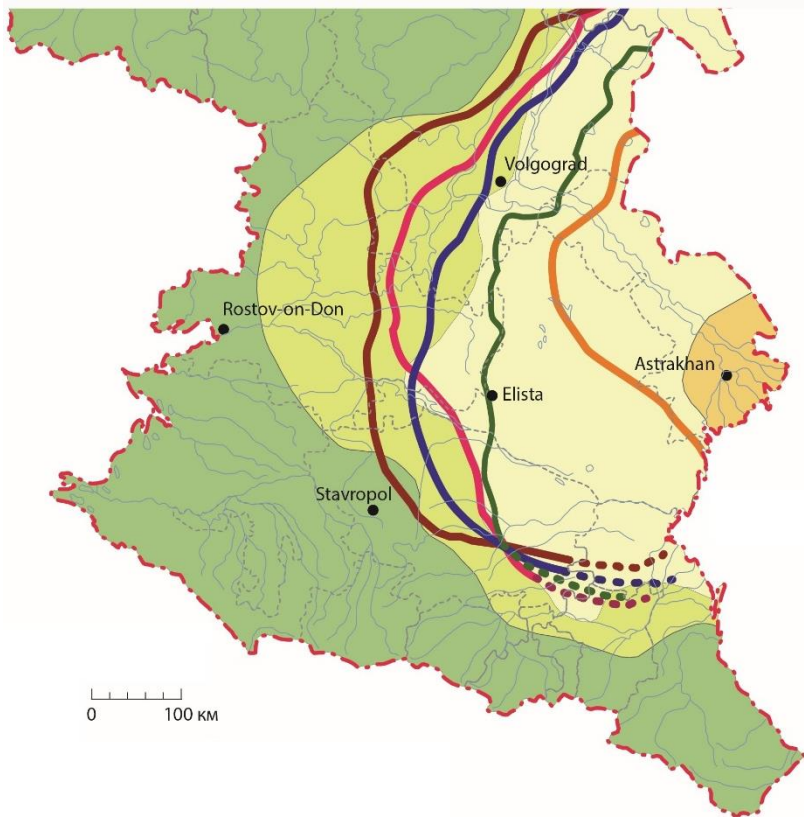
Climate classification

Dry or arid

Semi-arid

Mediterranean

Semi-humid



Результаты ГИС моделирования сдвига границы граница сухостепной и пустынно-степной зоны (IDM = 20) на юге Восточно-Европейской равнины в разные хроноинтервалы голоцена по палеопочвенным данным (**MS-climate**)

За последние 6000 лет на территории Волго-Донского междуречья происходили неоднократные изменения климатической ситуации, вызывавшие миграции границ почвенно-географических зон с амплитудой до 200–300 км.



Изолинии индекса аридности (значение «20») в различные исторические периоды

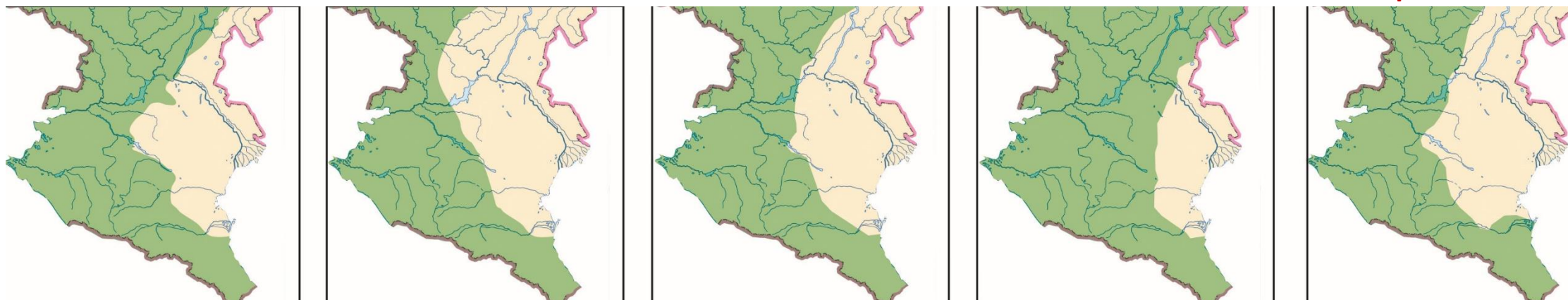
6000-5000 л.н.

4000-3000 л.н.

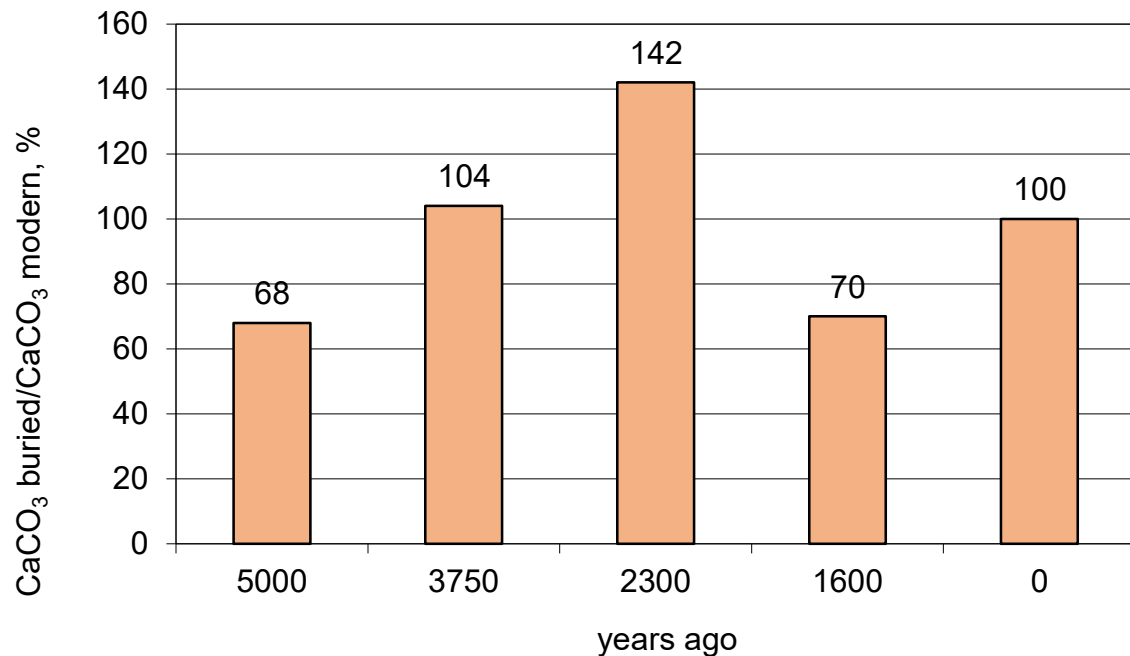
1700-1600 л.н.

700-600 л.н.

Современность

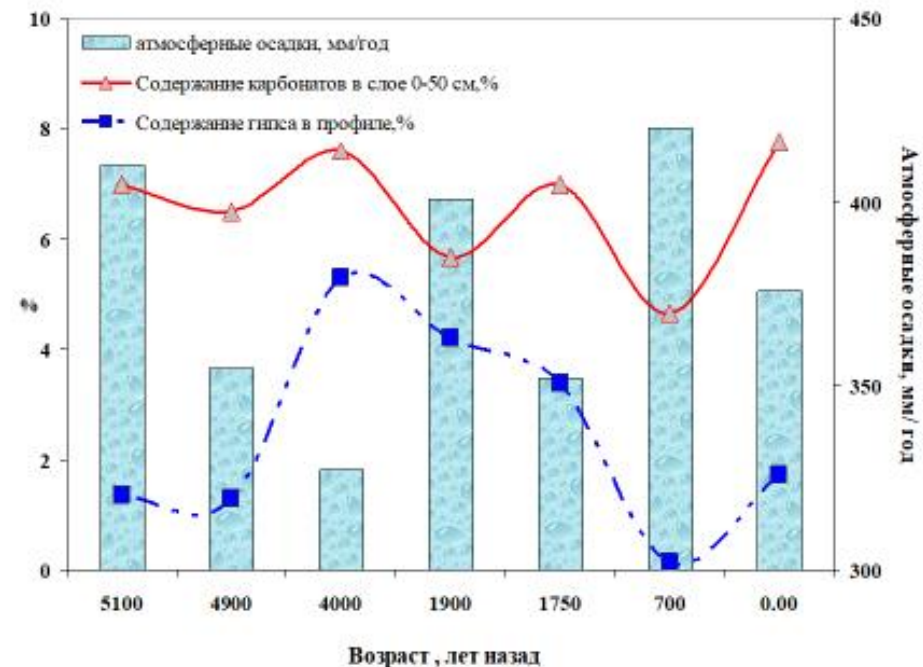


Количество почвенного карбоната в почвах Русской равнины за последние 5000 лет (в слое 0-2 м)



Погребенные почвы

Связь динамики содержания гипса и карбонатов в подкурганых палеопочвах с реконструированным количеством атмосферных осадков



Установлено, что содержание карбонатов по отдельным генетическим горизонтам и особенности их профильного распределения в верхней двухметровой толще палеопочв характеризовались значительной динамикой в масштабе исторического времени. Это было обусловлено изменчивостью факторов почвообразования, прежде всего климата.

Весьма заметную вековую динамику, обусловленную изменчивостью атмосферной увлажненности, испытывали глубина залегания карбонатного горизонта и линии вскипания с амплитудой от 0 до 30-40 см, формы сегрегации карбонатов (пропитка, пятна, белоглазка), запасы CaCO_3 в слое 0-50 см.

Как показали расчеты (Демкин, 1997; 2007), скорости выноса/накопления карбонатов в верхней полуметровой толще колебались в пределах 3-15 г/м² в год. Эти величины представляются довольно существенными, если учесть, что максимальные запасы CaCO_3 в этом слое древних почв не превышали 50-60 кг/м².

Палеопочвенные данные свидетельствуют о том, что 4500-4000 лет назад произошла резкая аридизация климата, обусловившая интенсивную дефляцию, дегумификацию и формирование поверхностно-карбонатных каштановидных палеопочв с содержанием CaCO_3 в горизонте A1 до 4-5%, с преобладанием пропиточных форм новообразований в верхних горизонтах.

Напротив, значительная гумидизация климата в эпоху развитого средневековья (600-800 лет назад) вызвала увеличение содержания гумуса (почти в два раза) и мощности гумусового горизонта, смещение на 20-30 см и более глубины вскипания, горизонта аккумуляции карбонатов, их сегрегацию в виде крупной и обильной белоглазки.



Проведенные исследования позволили выявить направленность и масштабы изменчивости карбонатного резервуара верхней части профиля почв. Даже на протяжении исторического времени он характеризовался довольно существенной динамикой, что должно было оказывать заметное влияние на концентрацию CO_2 в атмосфере.

Количество педогенных карбонатов зависит прежде всего от климатических условий, т.е. от типа почв и, в меньшей степени, от возраста почв и содержания литогенных карбонатных обломков в материнской породе.

Для почв Русской равнины выделяют две эпохи карбонатонакопления. Эти эпохи совпадают с эпохами аридизации климата.

В ходе процесса почвообразования в течение последних 5 тыс. лет почва фиксирует диоксид углерода в виде педогенного карбоната во время аридных периодов, со скоростью около $2,2 \text{ кгC}/\text{м}^2$ в год в черноземах, $1,13 \text{ кгC}/\text{м}^2$ в год в темно-каштановых почвах, и $0,86 \text{ кгC}/\text{м}^2$ в год в светло-каштановых почвах.

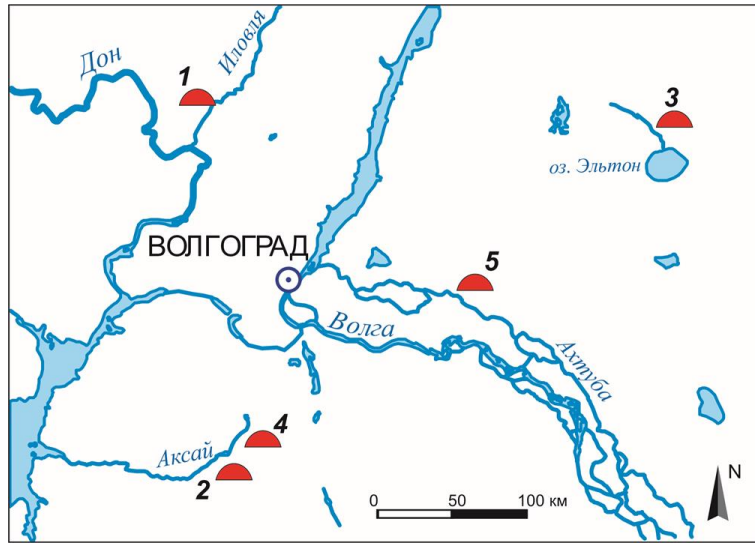
Таким образом, в течение последних 3500–5000 лет почвы секвестрируют диоксид углерода из атмосферы, в виде карбонатов и, таким образом, служат в качестве дополнительного стока в цикле углерода.

Почвенные карбонаты являются стоком для атмосферной CO_2 , составляя около 2,6% от общей эмиссии CO_2 из почв.

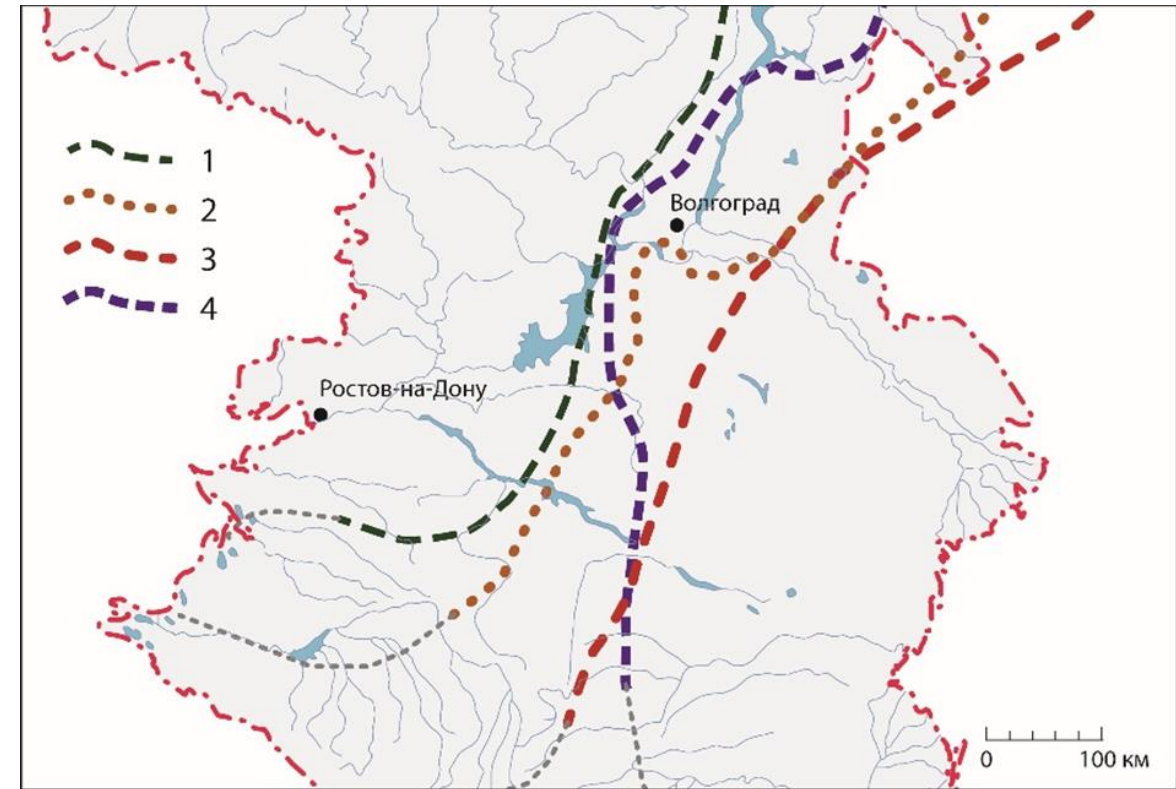
Общий вклад CO_2 , освобождавшегося из карбонатных соединений, в эмиссию можно считать на настоящий момент не большим. Вместе с тем, его количественная оценка для эпох с повышенным увлажнением и уменьшением запасов карбонатов в слое 0–50 см представляется важной и может быть произведена в дальнейшем при накоплении фактического материала и совершенствовании методов расчётов.

Мониторинг климатических изменений исследуемой территории за последние 40 лет - «вчерашний день»

Проведено сравнение результатов почвенных исследований в разные годы конца прошлого века с данными повторно выполненных исследований почв на тех же объектах в 2019-2020 годах с целью мониторинга ответа почв сухостепной и полупустынной зон юга и юго-востока Русской равнины на текущие климатические изменения.



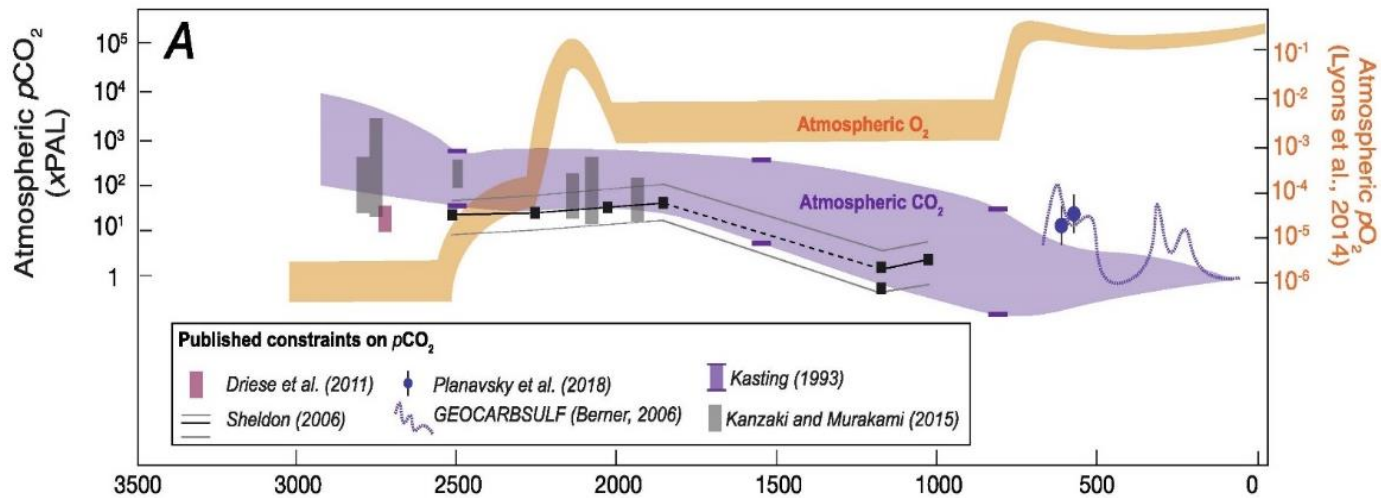
1 - курганный могильник "Авиловский", 2 - курганный могильник "Перегрузное", 3 - курганный могильник "Эльтон", 4 - курганный могильник "Абганерово", 5 - курганный могильник "Маляевка".



Изолинии индекса аридности, для периода 1960-2020 гг. (индекс аридности IDM = 20), 1 - 2020, 2 - 2000, 3 - 1980, 4 - 1960 гг.

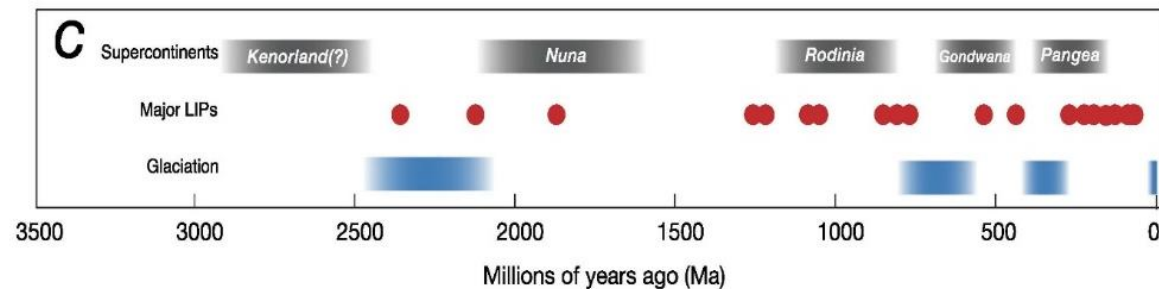
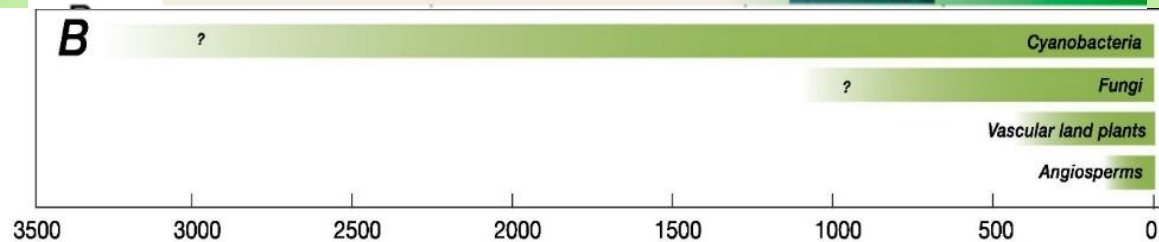
Тенденция усиления засушливости в начале XXI в. после этапа повышенного увлажнения второй половины XX в. выявлена практически для всей территории юга Восточно-Европейской равнины.

Показано, что повторные обследования изученных 20-40 лет назад почв не зафиксировали заметных изменений их свойств. Распределение по профилю почв карбонатов, содержания Сорг и обменного Na⁺ в солонцовых горизонтах практически не изменилось. На уровне общей тенденции отмечено незначительное увеличение засоленности верхней метровой почвенной толщи.



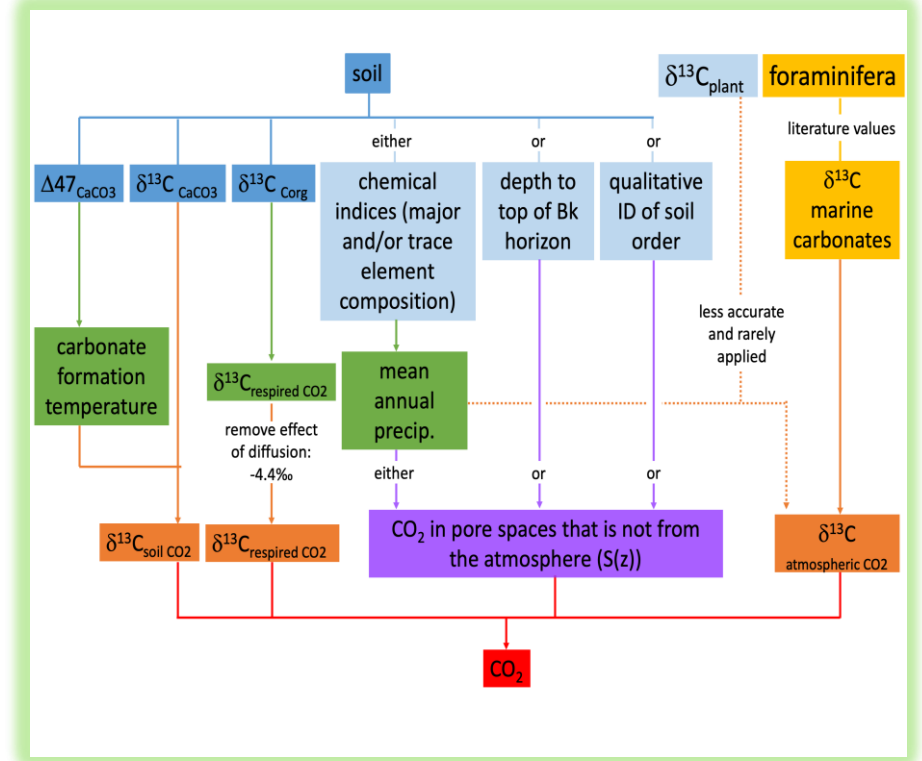
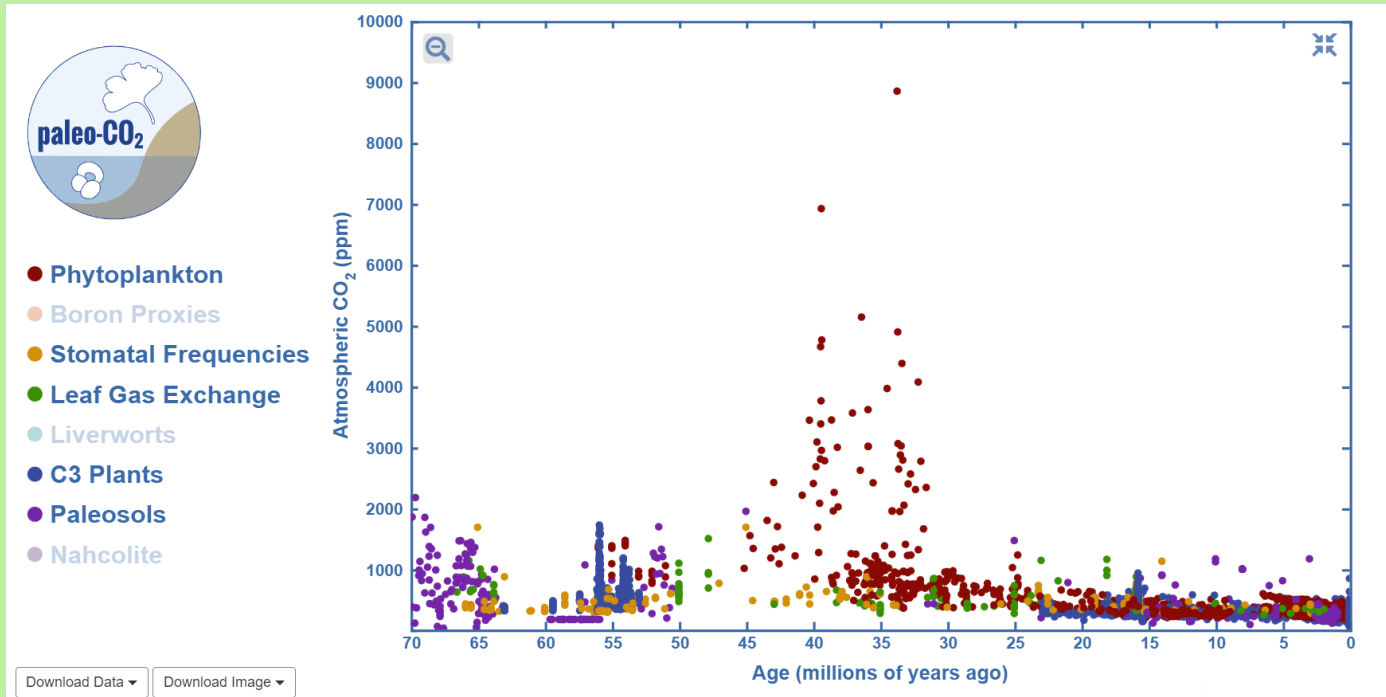
Эволюция биологических показателей и химического состава атмосферы на протяжении истории Земли

Актуальным направлением палеопочвенных исследований являются глобальные реконструкции палео- CO_2 и создание детализированной летописи в рамках международного сотрудничества.



Для понимания возможных будущих глобальных изменений климата, необходимо заглянуть как можно дальше в прошлое, в те времена в истории Земли, когда содержание CO_2 в атмосфере было существенно выше, чем сегодня.

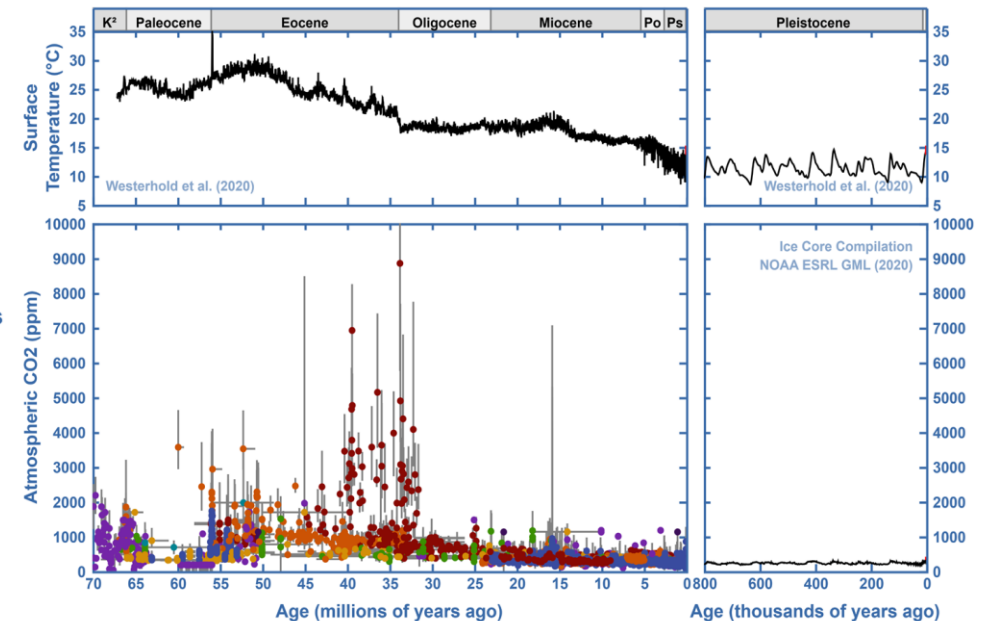
Phanerozoic CO₂ Proxy Integration Project (CO₂PIP)

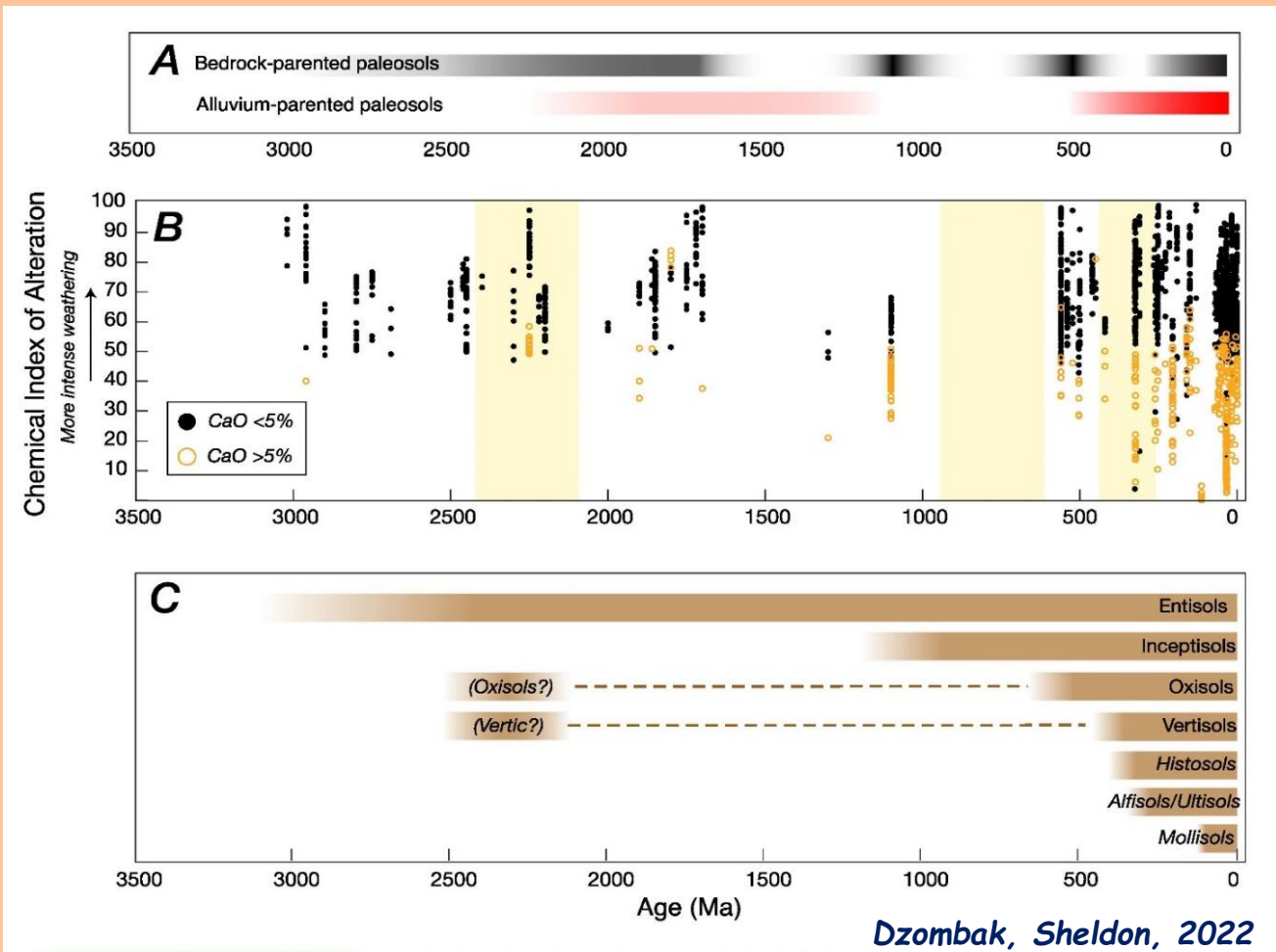


Преимущество палеопочвенных индикаторов заключается в том, что они не теряют чувствительность при высоком уровне концентраций CO₂ и могут использоваться на протяжении широкого временного интервала, включающего последние 400 миллионов лет.



- Phytoplankton
- Boron Proxies
- Stomatal Frequencies
- Leaf Gas Exchange
- Liverworts
- Land Plant $\delta^{13}\text{C}$
- Paleosols
- Nahcolite

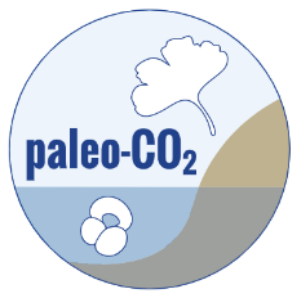




Биогеохимические модели по своей сути включают предположения о периодах, темпах и величине континентального выветривания; однако до сих существуют проблемы с определением параметров таких моделей.

В записи не обнаружено никаких однонаправленных изменений состояния средней интенсивности выветривания, как предполагалось ранее.

В фанерозойских палеопочвах наблюдается увеличение общего диапазона значений химического индекса (CIA), причем увеличение диапазона CIA обусловлено появлением палеопочв с высоким содержанием CaO.



Биогеохимические модели должны учитывать фанерозойское увеличение содержания CaO в палеопочвах при моделировании круговорота углерода и других связанных биогеохимических процессов.

Для реализации возможности ретроспективного анализа и сравнения почвенных свойств в пространственных и временных рамках актуально обобщение и структуризация накопленных палеопочвенных данных.



<https://geoarch.pbcras.ru/>

«SOILGEOARCH»

Почвы и геoarхеологические архивы
Восточно-Европейской равнины

Soils and Geoarchaeological archives of East
European Plain



(С) Лаборатория геохимии и минералогии почв ИФХиБПП РАН
ФИЦ ПНЦБИ РАН



Одним из вариантов может служить создаваемая в ИФХиБПП РАН информационная система с использованием методов ГИС-технологий «SOILGEOARCH-почвы и геoarхеологические архивы Восточно-Европейской равнины».

Созданы и зарегистрированы база данных «Комплексные характеристики почв степной зоны Европейской части России (Почвы ЕТР)» (RU2023620299) и База данных «Палеопочвы археологических памятников степей Восточно-Европейской равнины» (RU2023620707).



За последние 20–30 лет в институте накоплена уникальная база образцов (более 300 палеопочвенных профилей голоцена и около 10 опорных разрезов плейстоцена) и аналитического материала для четвертичных почв региона.

«SOIL GEO ARCH»
Почвы и георхеологические архивы Восточно-Европейской равнины
Soils and Georcheological archives of East European Plain

Общая информация о данных, собранных в проекте

Информация, собранная в ходе полевых исследований (экспедиционные и индивидуальные проекты) объединяет различные данные о почвенных характеристиках. Представлены данные о химических, физических и других свойствах створных образцов.

База данных содержит информацию по почвенным разрезам (их географическое местонахождение, время отбора образцов, с указанием о принадлежности к какому-либо проекту), включая описание обнаруженных слоев и их характеристики. Возможно внесение дополнительной информации, уточняющей представленные объекты в виде комментариев (фотографии, ссылки на другие источники информации).

Информация может быть выбрана несколькими способами: как по региону проводимых исследований, так и по отдельным почвенным характеристикам. Информация привязана как к почвам современного периода (параметр выборки: "время погребения" = 0, что соответствует современным почвам), так и к палеочувам геологических и исторических периодов времени (параметр выборки: "время погребения" = 700, что соответствует погребенным почвам около 700 лет назад).

Статистика

- Объектов: 98
- Группы: 26
- Регионов: 18
- Почвенных разрезов: 19
- Слоев: 95

О НАС СОСТАВ ДАННЫХ ПОИСК ЛИЧНЫЙ КАБИНЕТ

Найдено: 105

По названию **ВЫБРАНО 3**

Название объекта

Регион - все -

Вход в группу - все -

Источник данных - все -

Тип почвы разреза - все -

Название слоя

Время (лет назад) погребения почвы

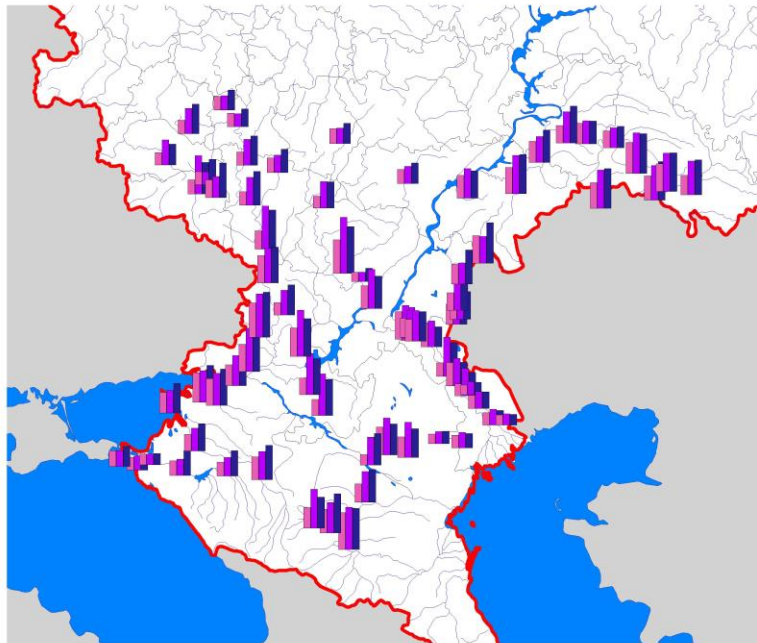
Дата отбора образца

Найти

- A18_T01 Липецкая обл.
- A18_T02 Липецкая обл.
- A18_T03 Орловская обл.
- A18_T04 Белгородская обл.
- A18_T05 Курская обл.
- A18_T06 Воронежская обл.
- A18_T07 Воронежская обл.
- A18_T08 Волгоградская обл.
- A18_T09 Волгоградская обл.
- A18_T10 Волгоградская обл.
- A18_T11 Волгоградская обл.
- A18_T12 Астраханская обл.
- A18_T13 Астраханская обл.
- A18_T14 Астраханская обл.
- A18_T15

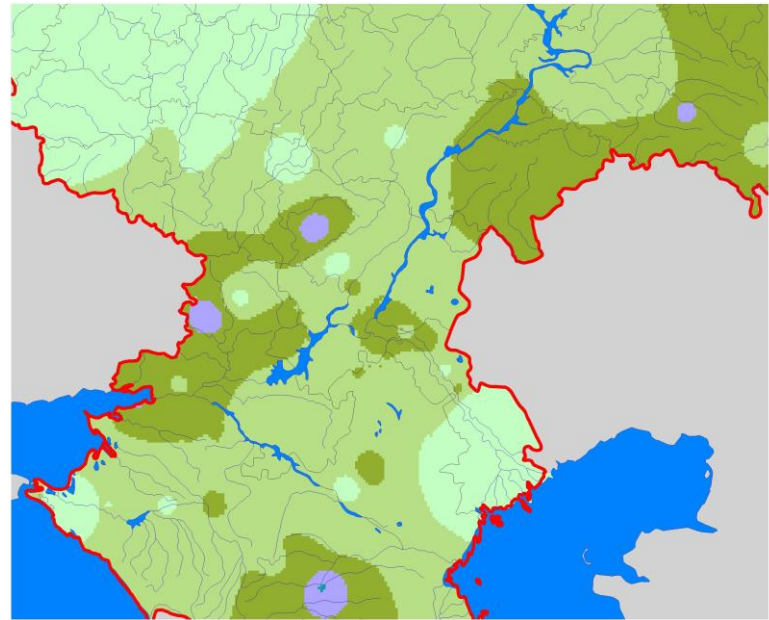
Современные почвы
Погребенные почвы
Почвенно-лессовые св

Современные почвы
Погребенные почвы
Почвенно-лессовые сврии



CaCO₃
слой 0-50 см

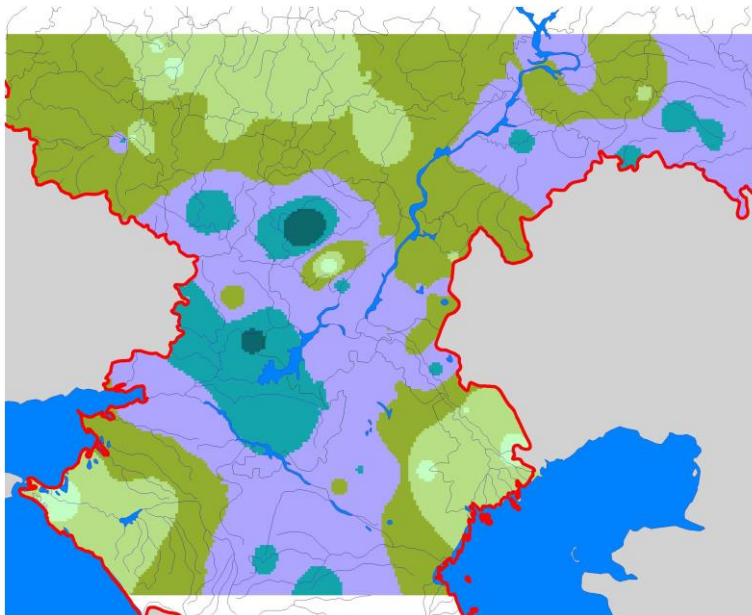
- > 15
- 12 - 15
- 9 - 12
- 6 - 9
- 3 - 6
- < 3



1:6000000

CaCO₃
слой 0-100 см

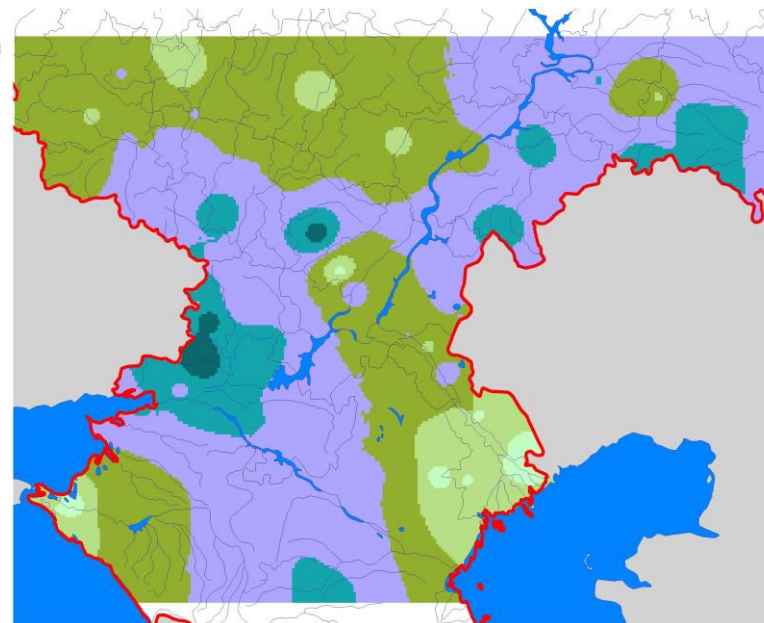
- > 15
- 12 - 15
- 9 - 12
- 6 - 9
- 3 - 6
- < 3



1:6000000

CaCO₃
слой 0-200 см

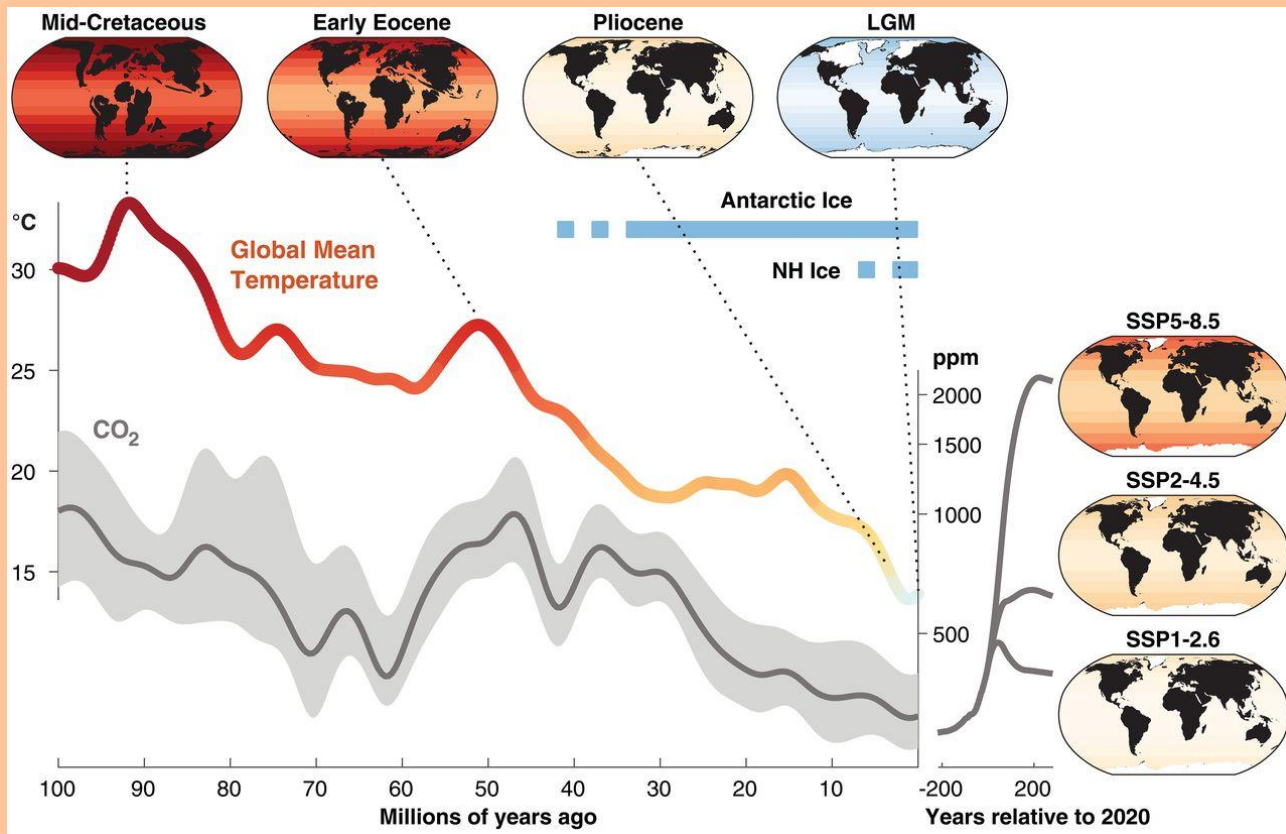
- > 15
- 12 - 15
- 9 - 12
- 6 - 9
- 3 - 6
- < 3



1:6000000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Палеоклиматический контекст для будущих климатических сценариев



- Для понимания возможных будущих глобальных изменений климата, необходимо заглянуть как можно дальше в прошлое, в те времена в истории Земли, когда содержание CO₂ в атмосфере было существенно выше, чем сегодня.
- Актуальным направлением палеопочвенных исследований являются глобальные реконструкции палео-CO₂ и создание детализированной летописи в рамках международного сотрудничества.
- Требуются дальнейшая проработка вопроса о прогнозе поведения карбонатов в системе почва-атмосфера для различных сценариев глобального изменения климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



Солонец



Каштановая почва



Чернозем

Существует вероятность, что обмен между карбонатами и CO_2 в почве значительно ускорится. Это означает повышенную уязвимость почв, содержащих $CaCO_3$, и возможные выбросы CO_2 в атмосферу.

Весьма информативным представляется ретроспективный анализ закономерностей вековой динамики запасов и профильного распределения педогенных карбонатов в связи с изменчивостью природных условий на протяжении исторического времени (последние несколько тысяч лет).

Реакция степных экосистем юга Европейской части России на разномасштабные изменения климата в прошлом (плейстоцен – голоцен- настоящее время) может быть использована как основа для оценки тренда предстоящих перестроек в состоянии естественных и агро-ландшафтов степной зоны .

Спасибо за внимание!



THEORETICAL BACKGROUND

- **Plant biomass differentiates with respect to carbon isotope composition (CIC). It is -27.00 ‰ for plants with C_3 photosynthesis and -13.0 ‰ for plants with C_4 photosynthesis [Hoefs, 1980; Cerling, 1984; Quade, J., et al, 1989]. The CIC of pedogenic carbonate is controlled, first by the ratio of $^{13}C/^{12}C$ of soil CO_2 , from which it forms, and second by isotope fractionation during the $CaCO_3$ precipitation.**
- **Because of the diversity of conditions and processes, pedogenic carbonates show a rather wide range of CIC - from -10 to 0‰ [Salomons et al, 1978]. CIC of lithogenic carbonates is from -2 to +2‰ [Marion et al, 1991; Hoefs, 1980; Cerling, 1984; Quade et al, 1989]. Thus, we can determine the fraction of pedogenic carbonates in soil from the CIC using the equation [Salomons and Mook, 1976] (2):**

•

•

• **% pedogenic carb. =**

$$\delta^{13}C_{\text{bulk}} - \delta^{13}C_{\text{lithogenic}}$$

× 100

(2)

•

$$\delta^{13}C_{\text{pedogenic}} - \delta^{13}C_{\text{lithogenic}}$$

- **This allows us to take into account pure soil carbonates, which were formed in equilibrium with the environment, from the evaluation of CO_2 production and accumulation.**