

## Биогеохимические особенности разновременных залежей в степной зоне

Ф. Н. ЛИСЕЦКИЙ<sup>1</sup>, Т. Н. СМЕКАЛОВА<sup>2</sup>, О. А. МАРИНИНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
308015, Белгород, ул. Победы, 85  
E-mail: liset@bsu.edu.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9  
E-mail: tnsmek@mail.ru

Статья поступила 15.04.15

Принята к печати 08.12.15

### АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты изучения разновременных залежей в древнеземледельческих районах Северо-Западного Крыма с неоднократными этапами земледелия (эпохи поздней бронзы, античности и последних 150–200 лет). По химическим элементам, определяющим состав вторичных глинистых минералов, проведен анализ различий биогеохимических потоков в почву для условий целины и залежи. Установлены наиболее информативные и эволюционно значимые биогеохимические индикаторы реликтовых аграрных нагрузок и длительности залежного режима.

**Ключевые слова:** восстановительные сукцессии, разновременные залежи, старопахотные почвы, биогеохимические индикаторы.

При функционировании природных травянистых экосистем главными созидательными механизмами выступают продукционный процесс и почвообразование. Новую информацию дает сопряженное исследование этих глубоко взаимосвязанных, взаимообусловленных процессов в отличие от раздельного изучения каждого из них [Динамика..., 2010]. Почва является поставщиком (донором), а растительность – потребителем (акцептором) минеральных элементов, и вместе они представляют собой единую функционирующую систему метаболизма экосистемы [Кержен-

цев, 2006]. Выявление эколого-почвенных связей на количественном уровне, учитывающих зонально-провинциальные и ландшафтные особенности, обосновано в числе наиболее важных и актуальных проблем экологии почв [Дергачева, 2009]. Используя аналогии в биогеоценологии, в изменениях почв выделяют эволюционные, сукцессионные, флуктуационные изменения и катаклизмы [Васенев, Щербаков, 2001].

Эволюционный подход к процессу почвообразования, согласующийся с новым взглядом на изменения растительности, поддер-

живается в некоторых современных исследованиях почвенных хронологий [Huggett, 1998; Walker et al., 2010].

Ранее на территории Крымского полуострова в разнообразных почвенно-климатических условиях изучены особенности почв в разновременных сериях постагрогенных [Lisetskii et al., 2015], постселитебных ландшафтов [Lisetskii, 2012; Lisetskii et al., 2013] и в пределах древних сакральных мест [Lisetskii, 2012; Лисецкий и др., 2014]. С экологической точки зрения, очень важно установить связь элементарных почвенных процессов с факторной обстановкой, обусловленной как периодичностью природных процессов, так и сменной историко-географических этапов хозяйственного освоения территории. В степных экосистемах на протяжении голоцена климатически обусловленные периоды имели различный потенциал поступления органического вещества от опада и корнеотпада, а в староосвоенных регионах неоднократно прерывались этапами земледелия со специфическими биогеохимическими условиями, складывающимися в агроценозах при тех или иных агротехнологических приемах и агро-мелиоративных практиках.

Уникальная по длительности история земледельческого освоения Степного Крыма открывает новые возможности для использования плодотворной идеи о совместном изучении восстановительной сукцессии растительности и почв [Whittaker, 1975; Мордкович и др., 1985; Lisetskii, 1998; Васенев, Щербаков, 2001; Wardle et al., 2009; Walker et al., 2010], применительно к рядам агрогенных трансформаций, включая их постагрогенные стадии.

Цель исследования – выявление биогеохимических особенностей разновременных залежей, включая уникальный по длительности режим ренатурации в постантичных агроландшафтах, с обоснованием наиболее информативных и устойчивых геохимических индикаторов памяти почв.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в пределах Тарханкутской возвышенной равнины (Северо-Западный Крым) на территории двух поли-

гонов: Раздольненского и Сакского (рис. 1). В геоботаническом и физико-географическом отношении оба полигона относятся к настоящим степям, формирующимся в условиях недостаточного увлажнения (при годовой сумме осадков 360–420 мм), к одному ландшафту – аккумулятивно-денудационной возвышенной лессовидно-суглинистой равнине с черноземами южными и дерново-карбонатными почвами под типчаково-ковыльной растительностью с участками петрофитных степей.

Предшествующими геоархеологическими исследованиями обоснованы репрезентативные участки для изучения разновременных залежей (от 20 до 2400 лет), включая этапы предыстории аграрного освоения земель (табл. 1). Особый интерес вызывают постантичные залежи, которые достоверно не подвергались распашке в XVIII–XX вв., что крайне редко встречается в других районах античной колонизации Северного Причерноморья.

Особенность античного периода освоения земель Северо-Западного Крыма заключалась в том, что перед греками-колонистами в IV в. до н. э. предстала не целинная степь, а агроландшафты, уже активно используемые оседлым аборигенным населением. Разведками 2007–2014 гг. на п-ове Тарханкут, на водосборах озер Донузлав и Сасык-Сиваш открыто более 130 селищ второй половины IV–III вв. до н. э., синхронных греческим усадьбам. Всего на Тарханкуте к настоящему времени, помимо крупнейшего античного центра Калос-Лимен, известно не менее трех десятков античных херсонесских усадеб, в том числе у Керкинитиды – более 20 [Смекалова, 2010]. Кроме того, в этом регионе известно 13 поселений эпохи поздней бронзы и более 5000 курганов.

На территории Северного Причерноморья в III в. до н. э. установился жаркий сухой климат, с резко выраженным континентальным обликом, вместо господствовавшего здесь в VI–IV вв. до н. э. сравнительно влажного климатического периода [Винокуров, 2004]. В Северо-Западном Крыму в IV в. до н. э. произошла смена климата от влажного и умеренного в середине столетия к сухому и жаркому в конце века. Вероятно, несколько регулярных засух, последовавших в самом кон-

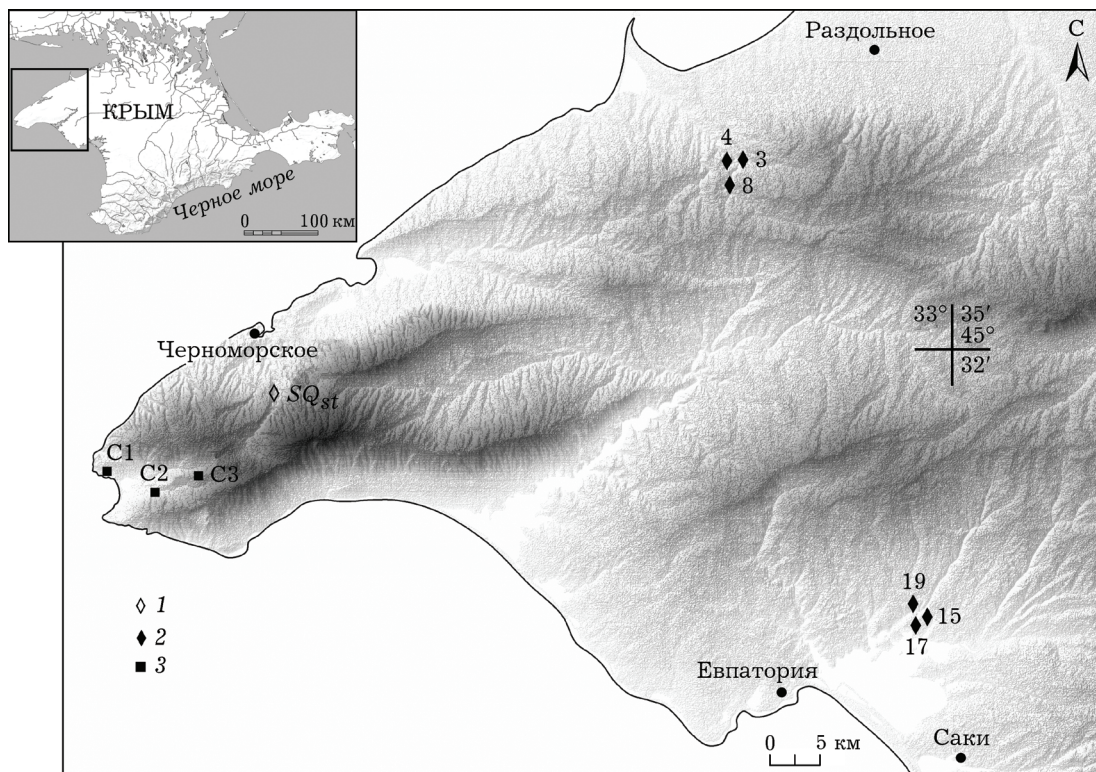


Рис. 1. Район исследований в Северо-Западном Крыму: 1 – эталонная почва (целина); 2 – разновременные залежи (места отбора почв и корней); 3 – места определения надземной фитомассы

це IV в. до н. э. и начале III в. до н. э., привели к угасанию земледельческих поселений. Этот период сменился продолжительным периодом сухого и жаркого климата (310–280 гг. до н. э.).

Используя имеющиеся археологические данные и результаты историко-картографического анализа, априорно предложена реконструкция истории освоения каждого из обследованных земельных участков (см. табл. 1), что позволяет сформировать гипотетический ранжированный убывающий ряд объектов по их антропогенной преобразованности:  $S15 < S4 < S8 < S3 < S19 < S17$ .

Величину надземного яруса травостоя оценивали в период его максимального развития в учетных площадках ( $1 \times 1$  м) с последующим высушиванием проб до абсолютно сухой массы. Фитомассу подземных органов определяли путем отбора монолитов почвы объемом  $1 \text{ дм}^3$  по слоям 0–10 и 10–20 см в конце активной вегетации травостоя. Согласно методике В. В. Утехина с соавт. [1976], корни отмывали на сите с размером ячеек 0,25 мм после неоднократной флотации и раз-

деляли на корневища ( $>0,6$  мм), деятельные и недейательные корни и взвешивали в абсолютно сухом состоянии.

Концентрацию макро- и микроэлементов в почвах определяли на рентгеновском спектрометре “СПЕКТРОСКАН МАКС-GV” по методике измерений массовой доли химических элементов. Для повышения достоверности полученные результаты, калиброванные по эталонным образцам почвы, сопоставляли в повторениях. Определения проводили для верхней (0–10 см) и нижней части гор. А (в среднем 10–20 см), а затем рассчитывали средневзвешенное значение. По этим данным рассчитаны величины 37 геохимических соотношений и коэффициентов (основные представлены в табл. 2). Модификация коэффициента  $K_S$ , предложенного Д. М. Шоу [Shaw, 1964], связана с расчетом произведения отношения в почве и материнской породе содержания рассеянных элементов с добавлением элементов-биофилов не как среднего арифметического, а по формуле среднегеометрического.

В качестве эталонных значений геохимически зрелой почвы использованы данные по

## Характеристика объектов исследования (2014 г.)

№ объекта	Расстояние до ближайшего памятника	Современное угодье	ОПП, %	Видов растений на 1 м <sup>2</sup>	Реконструкция истории освоения и залежного режима
		Полигон 1 (Раздольненский)			
S4	В 147 м от двухслойного поселения (XIII–IX вв. до н. э. и РЖВ) с двойным каменным загоном для скота	Постагичная залежь в массиве “длинных полей” (5 га)	80	5	Пашня в РЖВ, залежь около 2300 лет
S3	В 216 м от S4	Залежь вблизи хутора XX в., выпас КРС	95	4	Выпас в ПБВ, пашня в древности, пастбищная нагрузка в сер. XX в.
S8	В 1,1 км от S4	Новая залежь	90	5	Пашня в XIX–XX вв., залежь около 20 лет
		Полигон 2 (Сакский)			
S19	В 305 м от пос. Тюмень 2 (II в. до н. э.)	Межкурганная зона шириной 8 м (между курганами IV в. до н. э. и ПБВ)	90	4	Ренатурация скальпированной почвы для курганной насыпи, около 2400 лет и/или ранее
S17	В 373 м от пос. Тюмень 2	Новая залежь	70	5	Целина, распаханная в 50–60-е гг. XX в., залежь более 50 лет
S15	В 12 м от пос. Тюмень 3 (XIII–XII вв. до н. э.)	Старая залежь, выпас овец	80	3	В ПБВ (сабагиновская культура) придомное земледелие и скотоводство, пашня в IV в. до н. э., залежь около 2300 лет

П р и м е ч а н и е. ПБВ – позднебронзовый век, РЖВ – раннежелезный век.

## Основные геохимические коэффициенты, использованные для диагностики агрогенных трансформаций почв

Геохимические коэффициенты ( $K_i$ )	Расчетная формула коэффициента	Автор, год
Индекс потенциального почвенного плодородия	$FI = (CaO + MgO + 10 \cdot P_2O_5) / SiO_2$	[Taylor et al., 2008]
Геохимические показатели педогенеза	Rb/Sr; Sr/Ba; Na/K; CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Ti/Al; K + Na/Al	[Eze, Meadows, 2014] (обзор)
Коэффициент аккумуляции микроэлементов и биофильных (Si, P, K)	$K_S = (E_1, E_2 \dots E_9)^{1/9}$ , где $E_i = S_i/P_i$ , $i$ – Ni, Zn, Mn, Pb, Cu, Co, Si, P, K	[Shaw, 1964] (в модификации авторов)
Коэффициент элювиирования	$K_{\Sigma} = Al_2O_3 / (MnO + CaO + K_2O + MgO + Na_2O)$	[Liu et al., 2009] (в модификации авторов)
Коэффициент подвижности	$K_{\Pi} = \Sigma(Na, K, Mg, Zn) / SiO_2$	[Lisetskii et al., 2015]
Сумма тяжелых металлов	HM = Co + Cr + Cu + Pb + Sr	–
Оценка качества почв для растений по содержанию необходимых для растений макро-, микроэлементов и полезных элементов в почвах	$SQ_i = (B_1 \cdot B_2 \cdot \dots \cdot B_{10})^{1/10}$ , где $B_1 \dots B_{10}$ – (K, Mg, Ca); (Mn, Fe, Ni, Cu, Zn); (Si, Al)	[Lisetskii et al., 2015] [Битюцкий, 2011]
Бонитет почвы	$B = 100 \cdot SQ_i / SQ_{st}$	[Lisetskii et al., 2015]

гор. А (0–36 см) дерново-карбонатной почвы в условиях целины ( $SQ_{st}$ ) (северо-запад Тарханкутского п-ова, см. рис. 1). Разрез заложен на платообразном участке под ковыльной ассоциацией (*Stipa capillata*) с участием разнотравья ( $\leq 10\%$ ).

Для отбора наиболее информативных биогеохимических индикаторов, которые относительно целинных условий характеризовали бы результаты неоднократных и уникальных по длительности этапов антропогенных воздействий и ренатурации почв и растительности, использовали комплекс статистических методов. В качестве критерия чувствительности геохимических соотношений и показателей к агрогенным нагрузкам ( $K_i$ ) использована относительная мера рассеяния признака  $i$  – коэффициент вариации ( $SV$ , %), позволяющий сравнивать выборки из однотипных генеральных совокупностей. Статистические расчеты по каждому  $K_i$  в слоях 0–10 и 10–20 см разновременных залежей ( $n = 12$ ) позволили провести предварительный отсев малочувствительных признаков по критериальному значению  $SV \leq 10\%$  (вариация слабая). Полученные результаты обрабатывали статистически с использованием пакетов про-

грамм Microsoft office excel и STATISTICA. Информативные геохимические индикаторы агрогенных трансформаций почв отобраны по результатам корреляционно-регрессионного и кластерного анализов (метод Уорда, Евклидова дистанция, значения нормированы по среднеквадратическому отклонению).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Восстановительные сукцессии растительности.** После прекращения распашки адаптивная трансформация структуры восстанавливаемых степных сообществ проходила сингенетично с ренатурацией почв. Сравнением с коренными сообществами установлено [Lisetskii, 1998], что отличия эдификационной структуры восстанавливаемой растительности сохраняются даже через 16–35 веков саморазвития, и поэтому длительностью сукцессии не снимаются те различия в продуктивности, которые обусловлены онтогенетической зрелостью почв. При формировании рядов агрогенных изменений почв следует учитывать, что с периодами активизации хозяйственной деятельности связаны хронологические сукцессии природной раститель-

ности и смены культур, севооборотов, угодий, поэтому на определенных историко-географических этапах фактор биогеохимического воздействия на почву имеет переменный характер.

Изучение растительности недавно оставленных агроугодий на юге Украины [Бондаренко, Васильева, 2008] показало, что флора брошенных полей по сравнению с флорой на пашне на 20 % пополняется новыми видами, преимущественно за счет зональных антропофильных видов, а участие зональных степных видов на брошенных полях возрастает в 3 раза: с 9 до 27 %. В районе нашего исследования восстановительные сукцессии на разновременных залежах имеют структуру фитомассы надземного яруса, которая отличается от коренных сообществ: на разновременных залежах (участки С2, С3 на рис. 1) по сравнению с целиной (участок С1 на рис. 1) количество видов высших растений уступает в 1,4 раза, а общая надземная фитомасса сухого вещества в 1,6–2,0 раза меньше.

Доля степных злаков, которые при увеличении возраста залежи переходят от корневищно-злаковой к дерновинно-злаковой стадии демутации, наиболее в постантичной залежи (*Stipa* sp., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Bromopsis cappadocica* (Boiss. & Balansa) Holub) и новой залежи (*Stipa lessingiana* Trin. & Rupr., *Koeleria cristata* (L.) Pers.), а в условиях целины остается один доминирующий вид (*Stipa capillata* L.).

Сукцессия на всех залежах, как показано ранее [Титлянова, Самбуу, 2014], довольно быстро (за 17 лет) приводит к сообществам, которые по видовому составу близки к исходным степным фитоценозам, однако структура фитомассы развивается медленнее, особенно в подземной сфере.

Депонирование надземной мортмассы ( $R + SC$ ) зависит от величины максимального запаса зеленой массы ( $F$ ) и скорости разложения мортмассы. Чем активнее продукционный процесс, относительной мерой которого служит  $F$ , и ниже скорость деструкции, тем больше накапливается надземной мортмассы. В данных условиях максимальная величина надземной мортмассы отмечена в условиях целины ( $436 \text{ г/м}^2$ ), а на залежах она уменьшается, причем новые залежи уступа-

ют по этому показателю постантичной залежи в 1,6 раза. Отношение  $(R + SC)/F$  отражает соотношение удельных скоростей процессов образования растительного вещества и его деструкции. В условиях целины все структурные части надземной фитомассы имеют наибольшие значения. В постантичной залежи активно ее накапливает надземная мортмасса при более низкой величине формируемой зеленой массы. В новой залежи наиболее интенсивно происходит деструкция растительного вещества.

Ранее показано [Динамика..., 1991], что при существенных различиях в величине первичной продукции двух типов экосистем – абсолютно заповедной степи и слабо эксплуатируемой пастбища ( $785$  и  $389 \text{ г/м}^2/\text{год}$  соответственно) – эти экосистемы очень близки по количеству разложившегося растительного вещества и результатам годового цикла формирования гумусовых веществ. При этом во внутригодовой динамике время максимума поступления углерода растительного вещества в почву принципиально отличается: в условиях целины он приходится на март, а на пастбище – на октябрь.

С учетом того, что для петрофитных степей Крыма установлена связь пика кривой цветущих видов с внутригодовым максимумом атмосферных осадков [Голубев, 1978], можно предположить, что максимальная продуктивность надземной фитомассы в условиях Северо-Западного Крыма будет приходиться на конец мая – середину июня. Осенью (в октябре) в условиях слабого выпаса (КРС) на черноземных почвах, когда роль *Stipa capillata* становится доминирующей, масса ( $F + R$ ) на 55 % (постантичная залежь) и 73 % (новая залежь) меньше, чем в условиях целины (табл. 3). Естественно, что при более сильной пастбищной нагрузке (овцы) эти различия сглаживаются. Увеличение массы подстилки на недавних залежах по сравнению с постантичными отмечено вне зависимости от типа почв и интенсивности пастбищной нагрузки. На черноземных почвах (полигон 1) масса подземных органов растений на залежах в слое 0–20 см составляет 54–44 % (в зависимости от ее длительности) от массы в условно коренном сообществе (S3). На дерново-карбонатных почвах (полигон 2)

Запасы фитомассы (г/м<sup>2</sup>) высшей растительности в условиях залежи (октябрь 2014 г.)

Объект <sup>1</sup>	H, см	Надземная фитомасса		Подземная фитомасса в слое, см			
		F + R	SC	0–10		0–20	
				живая <sup>2</sup>	мертвая	живая <sup>2</sup>	мертвая
Полигон 1 (Раздольненский)							
S3	94	723,2	337,8	1273,7	1140,7	1556,3	1649,8
S4	66	323,0	186,7	632,8	795,7	753,8	972,4
S8	110	194,8	239,5	216,7(354,2)	529,3	328,5(415,7)	665,6
Полигон 2 (Сакский)							
S19	40	134,4	68,0	1349,9(136,6)	1088,9	1508,2(136,6)	1355,8
S15	50	127,4	77,4	1956,2	959,2	2081,3	1196,9
S17	43	88,6	187,9 <sup>3</sup>	498,5(83,5)	786,6	709,1(83,5)	954,0

П р и м е ч а н и е. H – высота травостоя; F – зеленая фитомасса; R – ветошь; SC – подстилка; <sup>1</sup> местоположение участков показано на рис. 1; <sup>2</sup> в скобках указана дополнительно масса корневищ (диаметр > 0,6 мм); <sup>3</sup> кроме того, подстилка содержит овечьи экскременты массой 50,2 г/м<sup>2</sup>.

в условиях выпаса масса корней на молодых залежах меньше, чем в квазиклимаксной экосистеме (S19), – на 42 %.

**Биогеохимические потоки в системе почва-растение.** От уровня содержания и набора микроэлементов во многом зависят многие почвенные биохимические процессы накопления, трансформации, переноса органических соединений в экосистеме, поскольку большинство микроэлементов воздействуют на растения [Орлов и др., 2005].

Изучение залежных экосистем в период вторичных сукцессий в сухостепной зоне [Егунова, 2011] показало, что надземная фитомасса и мортмасса, накопленные за 5–15 лет, содержат больше азота и зольных элементов (Ca, Mg, P, K) в 1,4–1,5 и в 1,6–1,7 раза соответственно, чем корни, но из-за преобладающего их количества (в 3–16 раз по данным табл. 3) роль корнеотпада значительно больше в формировании химизма почвы.

В залежах при меньшем приходе растительного вещества, но из-за большего разнообразия ботанических групп растений формируются более благоприятные условия по сравнению с целиной по сумме прихода в почву НРК: 1,70 и 1,62 т/га в год соответственно.

По величине ежегодного прихода растительного вещества с видами-доминантами и обобщенным данным их зольного состава [Ай-

динян, 1954; Базилевич, 1962; Родин, Базилевич, 1965; Лисецкий, 1992; и др.] определено, что поступление оксидов (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO), определяющих состав вторичных глинистых минералов, в условиях залежей по сравнению с целиной уменьшается незначительно, причем приход Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO больше, а SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> меньше. В условиях целины биогеохимическая активность доминанта *Stipa capillata*, выраженная через общий приход с опадом и корнеотпадом в слое 0–20 см по данным табл. 3, дополненным оценками скорости трансформации растительного вещества в многолетних экспериментах [Lisetskii et al., 2011], и усредненные данные зольного состава, можно выразить рядом: Fe < Mg < Al << Si. Для залежей биогеохимические особенности поступления оксидов немного отличаются: Fe < Mg = Al << Si, при этом суммарные величины поступления в почву указанных четырех элементов близки: для целины и залежи 6,16 и 6,34 т/га в год соответственно.

Учитывая минералогический состав гор. А степных почв (соотношения в них монтмориллонита, вермикулита и каолинита с хлоритом) и содержание оксидов (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) в каждой из групп минералов, рассчитаны их относительные доли, составившие 46, 18, 12 и 24 % соответственно. В старозалежных почвах это соотношение (в

Наиболее информативные геохимические показатели залежных почв

Геохимические соотношения и коэффициенты	Номер разреза и слой почвы, см															
	S3		S4		S8		S19		S15		S17					
	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20				
Ca+Mg+K	9,24	11,38	10,31	4,28	20,26	20,60	20,43	15,91	17,87	16,89	8,36	9,45	8,91	13,61	14,91	14,26
Ca/Zr	0,03	0,04	0,04	0,01	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,04	0,05	0,04	0,07	0,08	0,08
Zr/Ti	459	491	475	434	458	455	456	293	323	308	301	351	326	372	379	376
Ti/(Al+Ca+Na+K)	3,16	2,50	2,83	5,47	1,27	1,26	1,26	1,76	1,52	1,64	3,17	2,78	2,98	2,16	1,96	2,06
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO)	3,16	2,96	3,29	2,21	2,73	2,43	2,95	2,91	2,46	2,35	3,16	2,96	3,29	3,54	2,41	2,21
NM=Co+Cr+Cu+Pb+Sr	313	289	301	312	298	333	336	341	350	346	280	272	276	364	354	359
K <sub>Э</sub>	0,48	0,41	0,45	1,13	0,19	0,18	0,19	0,28	0,24	0,26	0,58	0,51	0,55	0,29	0,26	0,28
K <sub>П</sub>	1,73	1,80	1,76	1,58	1,34	1,46	2,62	1,96	1,97	1,96	1,58	1,56	1,57	2,16	2,23	2,19
K <sub>S</sub>	1,20	1,08	1,14	1,16	0,80	0,79	0,79	1,02	0,92	0,97	1,11	1,03	1,07	1,06	1,03	1,05
SQ	7,22	7,23	7,23	6,67	6,47	6,26	6,36	7,39	7,12	7,25	7,07	7,07	7,07	7,09	7,07	7,08
B	102	102	102	94	91	88	90	104	101	102	100	100	100	100	100	100

Примечание. Расчетные формулы коэффициентов представлены в табл. 2.

группе из четырех оксидов) в среднем для слоя 0–20 см составляет 75, 17, 5 и 3 % соответственно. В постарогенных залежах почва в слое 0–20 см отличается увеличением по сравнению с целиной доли кремнезема и снижением доли оксидов Al и Mg (табл. 4). Эти особенности наиболее выразительно проявляются по характеристикам слоя 10–20 см в сравнении со слоем 0–10 см. Поэтому такой безразмерный показатель, как SiO<sub>2</sub>/Σ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) для слоя 0–20 см характеризуется увеличением в постарогенных залежах по сравнению с условиями ренатурированной экосистемы (в пределах своего полигона – S3 и S19) на 0,3–0,4 и на 0,5 при расчетах по слою 10–20 см.

Так как среди глинистых минералов наибольшим содержанием SiO<sub>2</sub> отличается монтмориллонит, а Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO – каолинит и хлорит, можно утверждать, что указанный показатель диагностирует активное внутрипочвенное выветривание наименее устойчивых минералов в постарогенных залежах. Степень необратимой агрогенной трансформации твердой фазы почвы в слое 10–20 см количественно оценивается от 17 % (на полигоне 1) до 21 % (на полигоне 2).

Мертвый растительный материал выполняет роль сорбционного, седиментационного и механического барьеров, где происходит концентрация тяжелых металлов [Ведрова, Мухортова, 2014]. Что касается почв, то антропогенный привнос металлов-загрязнителей может обеспечить земледелие (при условии внесения удобрений), но особенно воздействия, связанные с близостью к человеческому жилью (продукты горения и др.). Значения НМ в слое 0–20 см (см. табл. 4) наиболее высоки у пашни нового времени, где практиковали использование минеральных удобрений (S8: здесь самое высокое содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 3,3 мг/100 г), и у почв полигона 2, что обусловлено их высокой карбонатностью. По сумме четырех тяжелых металлов НМ (исключая Sr, связанного с Ca) в слое 10–20 см отличаются повышенным содержанием почвы тех залежей, которые находятся вблизи селитебных территорий (S4 и S15) (см. табл. 4).

**Биогеохимические особенности разновременных залежей.** Эколого-генетический анализ позволяет определить способность пост-



агрогенных почв отражать, запоминать, кодировать в своих свойствах информацию о факторах и процессах педогенеза, что проявляется в такой характеристике почвы, как ее рефлекторность [Соколов, 1985].

Сопоставление старозалежных почв с их более зрелыми аналогами в пределах каждого из полигонов (S4 с S3 и S15 с S19) показало, что по коэффициенту аккумуляции общим для залежей является накопление Ti, Fe, Si, K, Co, Cu, Pb, Zr, Rb, Cr, V, Y, а также обеднение такими элементами, как Ca, P, Mg, Na, Sr. У почв, которые недавно обрабатывались, различия связаны только с одним элементом – кремнием, содержание которого меньше на 15–35 %.

Ранее предложена группировка биогеохимической подвижности главных продуктов почвообразования [Ковда, 1984]. В частности, к соединениям очень высокой подвижности отнесены нитриты и хлориды щелочей и щелочных земель, сульфаты Na, K, Mg, Zn, карбонаты Ca и K. В последнюю, пятую группу подвижности входят кварц и циркон, которые часто принимают за соединения-свидетели, по отношению к ним рассчитывают миграционную способность других продуктов выветривания и почвообразования. Использование указанной группировки позволило нам разработать серию из 15 коэффициентов, среди которых путем сопоставлений и содержательного анализа обоснован оптимальный для данных почвенно-климатических условий коэффициент подвижности ( $K_{\text{п}}$ ) (см. табл. 2). Если значение  $K_{\text{п}}$  уменьшается, то он диагностирует в почвенной системе вынос соединений, имеющих максимально высокую биогеохимическую подвижность. Этот процесс, как показано ранее [Лисецкий, 2008], сопровождается длительную земледельческую нагрузку и надолго сохраняется в почвенной памяти. Основные причины, определяющие агрогенно обусловленную специфику формирования морфологического строения почв степной зоны, сводятся к следующему: на пашне по сравнению с целиной выше водопроницаемость свежеработанной почвы; увеличивается глубина весеннего промачивания, укорачивается период десуктивного расхода влаги, в результате более контрастного иссушения

формируется характерное вертикальное растрескивание гумусового горизонта, появляется возможность осенней влагозарядки, исчезает “мертвый” горизонт иссушения, формируется периодически промывной тип водного режима и создаются предпосылки для редкого (в экстремально влажные годы) глубокого промачивания почв и грунтов [Лисецкий, 2008].

Диагностические возможности коэффициента подвижности должны проявляться также в его высоких значениях для тех объектов, где процессы выноса замедлены (длительно ренатурированные залежи), если игнорировать воздействия этапов предыстории, включая продолжительные земледельческие нагрузки. Рассмотрение групп объектов по полигонам показало устойчивую закономерность по большинству опробованных биогеохимических коэффициентов: максимальный вынос соединений с высокой биогеохимической подвижностью отмечен для недавних пашен, им уступают длительно ренатурированные залежи, а максимально свидетельства агрогенеза сохранились в постантичных залежах. Примечательно, что установленный коэффициент  $K_{\text{п}}$  имеет сильную тесноту связи с молярным отношением  $\text{CaO}/\text{ZrO}_2$  ( $r = 0,81$ ), которое ранее [Gerrard, 1981] рекомендовано в качестве показателя химического выветривания, так как роговая обманка, содержащая кальций, лучше поддается выветриванию, чем циркон.

При определенных географических различиях исследовательских полигонов результаты кластерного анализа показывают приоритет в формировании классификационных групп почвенных объектов таких признаков, как история и длительность антропогенных трансформаций и залежного режима. Важно отметить, что не было случая, чтобы почвенные слои 0–10 и 10–20 см определенного объекта входили в состав другого кластера (рис. 2). Это отражает генетическую целостность верхней части гумусово-аккумулятивного горизонта и парагенетическую связь отдельных его частей.

Старозалежные почвы являются самобытным классом, который по восьми самым информативным геохимическим показателям, использованным в кластерном анализе, наи-

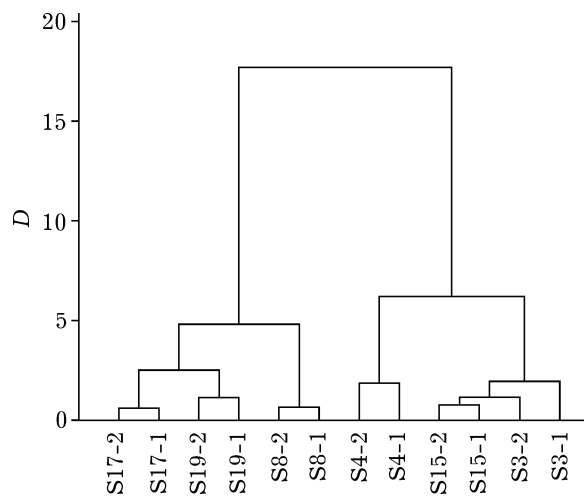


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа почв разновременных залежей

более отличаются по значениям, усредненным в слое 0–20 см. Важно подчеркнуть, что почвы S3, S4, S15, потенциально имеющие возможность испытать доантичное земледелие носителями сабастиновской культуры в XIV–IX вв. до н. э., развивались в условиях большей увлажненности и более прохладного климата.

По результатам кластерного анализа на низком уровне пороговых расстояний связаны те почвы, которые характеризуются наименьшей антропогенной преобразованностью, выраженной в их биогеохимическом статусе (S19 и S17). По результатам дешифрирования космических снимков установлено, что объект S17 находится на периферии массива со следами древнего межевания земель. Этот массив характеризует участок S15, где до сих пор в полевых условиях выявляются невысокие (до 25 см) земляные валики древнего землеустройства. Использование объективного метода датирования залежей, основанного на статистической выборке объема погруженных в почву камней [Lisetskii et al., 2014], показало, что при сравнении площадок полувековая залежь (объект S17) достоверно (при  $P = 95\%$ ) отличается от старозалежного участка (объект S15), где камни в среднем на 16 % более заглублены в почву. Однако только комплексный геохимический анализ доказал отсутствие предыстории земледельческого освоения участка, где находится объект S17.

Пахотные почвы, не имевшие земледельческой предыстории (S8), в биогеохимическом отношении оказались ближе к малоизмененным почвам, чем к старозалежным. На дендрограмме типологическую группу формируют старозалежные почвы даже при нахождении объектов на территориально удаленных полигонах, но для которых объективно установлены один (S4), два этапа древнего земледелия (S15), либо он может аргументированно предполагаться (S3). Из восьми геохимических показателей, использованных в кластерном анализе (см. табл. 4), по оценкам тесноты связи геохимическую общность старозалежных почв в наибольшей мере определяют соотношения:  $Ti/(Al + Ca + Na + K)$ ,  $Ca + Mg + K$ ,  $Ca/Zr$  и интегральные коэффициенты  $K_{Э}$ ,  $K_{п}$ ,  $K_{S}$ . Таким образом, в сравнении с другими объектами в старозалежных почвах отмечается более высокая аккумуляция микро- и биофильных элементов, что подтверждается более низкой биогеохимической подвижностью главных продуктов почвообразования, но сохраняется реликтовая (от аграрных нагрузок) результативность элювиального процесса, которая в античных земельных наделах по значениям  $K_{Э}$  в 2–3 раза превышает средние значения. Кроме того, старозалежные почвы отличаются меньшим содержанием необходимых для растений макро-, микро- и полезных элементов, суммы пяти тяжелых металлов, и в результате они больше выщелочены как в отношении карбонатов кальция (молярное отношение  $CaO/ZrO_2$  существенно меньше), так и ряда других элементов биологического поглощения.

Комбинаторным исключением каждого из восьми геохимических показателей доказана устойчивость формирования типологических групп почв, выявленных по результатам кластеризации (см. рис. 2). Закреплением в почвах свидетельств геохимических трансформаций в результате той или иной продолжительности земледельческих нагрузок обусловлено устойчивое разделение на две большие классификационные группы: объекты, сохраняющие свидетельства агрогенеза эволюционного порядка (S3, S4, S15) и объекты с рецентными признаками агрогенеза (S8, S17), либо их отсутствием (S19).

Используя в качестве эталона показатели гор. А целинной почвы ( $SQ_{st}$ ), установлено, что полная ренатурация слоя 0–20 см в геохимическом отношении произошла у залежной почвы S3 и абрадированной в древности S19 ( $B = 102$ ). Частная диагностика остаточной антропогенной трансформации по значениям B в слое 10–20 см показала наибольшую незавершенность ренатурационных процессов у почвы S4 и особенно у S8.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известные в литературе оценки времени полного восстановления растительных сообществ при зацелинении залежи сильно различаются: от 50 до 200 лет. Состояние квазиклиматса в растительном сообществе определяется компонентом экосистемы с наибольшим характерным временем – эдафотопом, что обуславливает необходимость диагностики реликтовой выпашанности почв и процессов ренатурации с помощью педогеохимических индикаторов.

Биогеохимические особенности верхнего горизонта залежных почв определяются, прежде всего, такими химическими элементами, как Ca, Na, K, Al, Fe, Mg, Mn, Zn, а также содержанием аккумулированных микроэлементов, биофильных элементов и некоторых тяжелых металлов. Диагностику элементарных почвообразовательных процессов целесообразно проводить при вовлечении указанных элементов в расчетные формулы геохимических соотношений и коэффициентов, использующих стабильные элементы.

Постагрогенная (полностью невосстанавливаемая) трансформация турбированных горизонтов почвы сохраняется в особенностях ее твердой фазы неожиданно длительное время и может быть диагностирована с помощью комплекса взаимно дополняющих биогеохимических индикаторов-свидетелей. Анализ геохимических показателей постагрогенных рядов почв в древнеземледельческих районах степной зоны показал, что наиболее информативными индикаторами реликтовых аграрных нагрузок и длительности залежного режима выступают соотношения  $Ti/(Al + Ca + Na + K)$ ,  $SiO_2/(Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO)$ ,

$Ca/Zr$ , сумма  $Ca+Mg+K$  и пяти тяжелых металлов, интегральные коэффициенты  $K_E$ ,  $K_{II}$ ,  $K_S$ . Таким образом, для старозалежных почв характерны повышенная аккумуляция микроэлементов и биофильных элементов из-за более низкой биогеохимической подвижности главных продуктов почвообразования, сохранение остаточной элювированности, большая степень выщелоченности в отношении карбонатов кальция и ряда других элементов биологического поглощения.

Использование биогеохимических коэффициентов позволяет оценить интенсивность агрогенно обусловленных трансформаций в почвенной системе, которые квалифицируются как эволюционно значимые воздействия на твердую фазу почвы, обусловленные длительностью земледелия при усилении (ослаблении) его влияния климатической периодичностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Айдинян Р. Х. Состав золы лугово-степной растительности Каменной степи и его влияние на образование почвенных минеральных коллоидов // Почвоведение. 1954. № 1. С. 45–53.
- Базилевич Н. И. Обмен минеральных элементов в различных типах степей и лугов на черноземных, каштановых почвах и солонцах // Проблемы почвоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 148–206.
- Битюцкий Н. П. Микроэлементы высших растений. СПб: Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2011. 368 с.
- Бондаренко О. Ю., Васильева Т. В. Зміна еколого-ценотичної структури флори покинутих агроугідь півдня України // Відновлення порушених природних екосистем. Донецьк, 2008. С. 77–80.
- Васенев И. И., Щербаков А. П. Почвенные сукцессии как имманентный элемент морфогенетической динамики почв // Вестн. ВГУ. Сер. химия, биология. 2001. № 1. С. 13–20.
- Ведрова Э. Ф., Мухортова Л. В. Биогеохимическая оценка лесных экосистем // Сиб. экол. журн. 2014. № 6. С. 933–944 [Vedrova E. F., Mukhortova L. V. Biogeochemical evaluation of forest ecosystems in the area affected by Norilsk industrial complex // Contemporary Problems of Ecol. 2014. Vol. 7, N 6. P. 669–678].
- Винокуров Н. И. Природные условия развития виноградарства и виноделия в Северном Причерноморье // Боспорские исследования / ред.-сост. В. Н. Зинько. Симферополь; Керчь, 2004. Вып. V. С. 62–89.
- Голубев В. Н. Фитоценотическая и эколого-биологическая структура петрофитной луговой степи предгорного Крыма // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1978. Т. 4, № 5. С. 449–456.

- Дергачева М. И. Экология почв: становление новой науки биосферного класса // Сиб. экол. журн. 2009. № 2. С. 143–150 [Dergacheva M. I. Ecology of soils: a new science of the biosphere class // Contemporary Problems of Ecol. 2009. Vol. 2, N 6. P. 625–630].
- Динамика растительного вещества и современные почвенные процессы в травянистых экосистемах / под ред. В. В. Снакина, Э. Ковач-Ланг, Т. Л. Быстрицкой и др. Пушино, 1991. 236 с.
- Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв / под ред. Д. И. Люри, С. В. Горячкина, Н. А. Караваевой и др. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
- Егунова Н. А. Экологическое состояние залежных экосистем в период вторичных сукцессий в сухостепной зоне Республики Хакасия // Вестн. Тувин. гос. ун-та. Естественные и сельскохозяйственные науки. 2011. № 2 (9). С. 89–94.
- Керженцев А. С. Новая книга о структурно-функциональной роли почв в биосфере // Почвоведение. 2006. № 1. С. 108–115.
- Ковда В. А. Биогеохимический круговорот и почвообразование // Биологический круговорот и процессы почвообразования. Пушино, 1984. С. 6–14.
- Лисецкий Ф. Н. Агрогенная трансформация почв сухостепной зоны под влиянием античного и современного этапов земледелия // Почвоведение. 2008. № 8. С. 913–927.
- Лисецкий Ф. Н. Периодизация антропогенно обусловленной эволюции степных экосистем // Экология. 1992. № 5. С. 17–25.
- Лисецкий Ф. Н., Голушов П. В., Судник-Войциковская Б., Мойсиенко И. И. Особенности микрозонального распределения почв и растительности по катенам курганных сооружений // Сиб. экол. журн. 2014. № 3. С. 373–388 [Lisetskii F. N., Goleusov P. V., Moysiienko I. I., Sudnik-Wojcikowska B., Microzonal distribution of soils and plants along the catenas of mound structures // Contemporary Problems of Ecology. 2014. Vol. 7, N 3. P. 282–293].
- Мордкович В. Г., Шатохина Н. Г., Титлянова А. А. Степные катены. Новосибирск: Наука, 1985. 117 с.
- Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Суханова Н. И. Химия почв. М.: Высш. шк., 2005. 558 с.
- Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с.
- Смекалова Т. Н. Памятники эпохи бронзы и раннего железного века на полуострове Тарханкут: Каталог. (Мат-лы к археологической карте Крыма. Вып. II). Симферополь, 2010. 204 с.
- Соколов И. А. Экология почв как раздел докучаевского генетического почвоведения // Почвоведение. 1985. № 10. С. 5–13.
- Титлянова А. А., Самбуу А. Д. Детерминированность и синхронность залежной сукцессии в степях Тувы // Изв. РАН. Сер. биол. 2014. № 6. С. 621–630.
- Утехин В. Д., Хоанг Тьонг. Структура и продуктивность фитомассы луговой степи // Биота основных геосистем Центральной лесостепи. М., 1976. С. 7–24.
- Eze P. N., Meadows M. E. Multi-proxy palaeosol evidence for late Quaternary (MIS 4) environmental and climate shifts on the coasts of South Africa // Quaternary International. 2014. Vol. 343. P. 159–168.
- Gerrard A. J. Soils and landforms: an integration of geomorphology and pedology. L., George Allen & Unwin, 1981.
- Huggett R. J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review // Catena. 1998. Vol. 32, N 3. P. 155–172.
- Lisetskii F. N. Autogenic succession of steppe vegetation in postantique landscapes // Rus. Journ. Ecol. 1998. Vol. 29, N 4. P. 217–219.
- Lisetskii F. N. Soil reproduction in steppe ecosystems of different ages // Contemporary Problems of Ecol. 2012. Vol. 5, N 6. P. 580–588. DOI: 10.1134/S1995425512060108.
- Lisetskii F. N., Chernyavskikh V. I., Degtyar' O. V. Pastures in the zone of temperate climate: trends for development, dynamics, ecological fundamentals of rational use // Pastures: Dynamics, Economics and Management / ed. by N. T. Procházka. Nova Science Publishers, Inc., USA, 2011. P. 51–83.
- Lisetskii F. N., Marinina O. A., Jakuschenko D. G. A new approach to dating the fallow lands in old-cultivated areas of the steppe zone // Res. Journ. Pharmaceutical, Biol. Chemical Sci. 2014. Vol. 5, N 6. P. 1325–1330.
- Lisetskii F., Stolba V. F., Marinina O. Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use // Geoderma. 2015. Vol. 239–240. P. 304–316.
- Lisetskii F., Stolba V., Ergina E. et al. Post-agrogenic evolution of soils in ancient Greek land use areas in the Herakleian Peninsula, southwestern Crimea // The Holocene. 2013. Vol. 23, N 4. P. 504–514.
- Liu G., Li L., Wu L. et al. Determination of soil loss tolerance of an entisol in Southwest China // Soil Sci. Soc. Am. Journ. 2009. Vol. 73, N 2. P. 412–417.
- Shaw D. M. Interprétation géochimique des éléments en traces dans les roches cristallines. Paris: Masson, 1964.
- Taylor G., Pain C. F., Ryan P. J. Geology, geomorphology and regolith // Guidelines for surveying soil and land resources / eds N. J. McKenzie, M. J. Grundy, R. Webster, A. J. Ringrose-Voase. 2nd ed. Melbourne: CSIRO PUBLISHING, 2008. P. 45–60.
- Walker L. R., Wardle D. A., Bardgett R. D., Clarkson B. D. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development // J. Ecol. 2010. Vol. 98, N 4. P. 725–736.
- Wardle D. A. Communities and ecosystems: linking the aboveground and belowground components. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2002.

Wardle D. A., Bardgett R. D., Walker L. R., Bonner K. I.  
Among and within-species variation in plant litter  
decomposition in contrasting long-term chronose-

quences // *Functional Ecol.* 2009. Vol. 23. P. 442–  
453.  
Whittaker R. H. *Communities and ecosystems*. Ed. 2. New  
York: Macmillan, 1975

## Biogeochemical Features of Fallow Lands in the Steppe Zone

F. N. LISETSKII<sup>1</sup>, T. N. SMEKALOVA<sup>2</sup>, O. A. MARININA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Belgorod State National Research University*  
308015, Belgorod, Pobedy str., 85  
E-mail: [liset@bsu.edu.ru](mailto:liset@bsu.edu.ru)

<sup>2</sup> *Saint Petersburg State University*  
199034, St. Petersburg, Universitetskaya Emb., 7–9  
E-mail: [tnsmek@mail.ru](mailto:tnsmek@mail.ru)

The article presents the results of the study of fallow lands in ancient agricultural areas of the North-Western Crimea which were subject to repeated phases of agricultural activity at different time periods: the Late Bronze Age, antiquity and the last 150–200 years. The differences in biogeochemical flows for virgin soils and fallow lands were analyzed using the chemical elements that determined the composition of secondary clay minerals. The most informative and evolutionarily significant biogeochemical indicators of relict agricultural loads and duration of fallow regime were specified.

**Key words:** secondary succession, fallow lands, agrogenic soils, biogeochemical indicators.