

ФОСФОР В БИОСФЕРЕ И ДЛЯ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА: НА ПОРОГЕ ГЛОБАЛЬНОГО ГОЛОДА

А.П. Дегтярёв

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

Эл. почта: *degtyarev_a@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 23.06.2023; принята к печати 04.08.2023

Биомасса как биосферы в целом, так и отдельных биоценозов в значительной степени лимитируется доступным фосфором. В настоящей статье приведены аргументы, позволяющие считать, что почвы появились в процессе эволюции как механизм удержания фосфатов от рассеивания за пределы сообществ наземных растений и редуцентов, а биогеохимическая роль лигнина состоит в том, чтобы служить основой для образования гумуса с функцией буферизации в нем фосфата. Вводятся понятия о слое и времени мобилизации элементов. Современные формы аграрного производства основаны на форсированном внесении удобрений и получении урожайности, намного превышающей фоновую. При этом внесенный фосфор на суше не накапливается ни в одном масштабном процессе и безвозвратно теряется в морских осадках. Через 80–200 лет после исчерпания фосфорных месторождений урожайность упадет до фоновой, что может привести к гибели от голода $\frac{3}{4}$ населения Земли. Численность населения, способного прокормиться без минеральных удобрений, составляет 2–2,5 млрд чел. Теоретически можно избежать «фосфорной катастрофы», если обеспечить радикальный переход на новые формы хозяйствования, при которых потери фосфора сведутся к минимуму.

Ключевые слова: фосфор в биосфере, фосфорные удобрения, глобальный голод, рациональное земледелие, плодородие почв.

PHOSPHORUS IN THE BIOSPHERE AND FOR THE HUMANKIND: ON A THRESHOLD OF GLOBAL FAMINE

A.P. Degtyarev

V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

E-mail: *degtyarev_a@mail.ru*

Phosphorus availability is a significant limiting factor of the biomass in the biosphere and its specific biocenoses. In the present paper, arguments are put forward to believe that soils have emerged in the course of evolution as a means of phosphorus sequestration making it possible to prevent phosphorus dissipation beyond terrestrial plant and decomposer communities, and the biogeochemical role of lignin is to be a base of humus formation, which buffers phosphates. The concept of element mobilization layers and periods is introduced. The current agricultural techniques are based on forced application of fertilizers in order to make crop yields much above background. As a result, the applied phosphorus is not accumulated terrestrially due to any of large-scale process and is irreversibly lost in the marine sediments. In about 80–200 years, after phosphorus deposits will be exhausted, crop yields will decrease to the background values, which may lead to dying out of ca. $\frac{3}{4}$ of the human population because of famine. Global population size sustainable without mineral fertilizers is about 2 to 2.5 billion. Theoretically, the “phosphorus catastrophe” may be avoided due to a radical transition to novel agricultural techniques, which can minimize the losses of phosphorus.

Keywords: phosphorus, biosphere, phosphorus fertilizers, global famine, rational agriculture, soil fertility.

Фосфор как лимитирующий фактор массы живого вещества

Геохимии фосфора в экосфере посвящен обширный пласт литературы, изложить который даже кратко здесь нет возможности. Отметим лишь, что современная геохимия фосфора подробно описывает резервуары фосфора в разных средах, потоки фосфора между континентами и океаном, внутриконтинентальные [3] и внутриконтинентальные циклы фосфора, подробно излагает процессы фосфатонакопления в океане [29]. Очень хорошо изучены «малые» внутриландшафтные циклы фосфора как в природных, так

и в сельскохозяйственных ландшафтах [38]. Огромный массив литературы, как отечественной, так и зарубежной, посвящен применению фосфорных удобрений, плодородию почв [38], истощению почвенных ресурсов [31], глобальным вопросам продуктового обеспечения [35]. Обзор той части литературы, которая наиболее близка к теме данной статьи, будет дан в конце изложения.

Уникальность геохимической роли фосфора заключается в том, что, будучи важнейшим биогенным элементом, без которого жизнь невозможна, он находится в ограниченном доступе практически во

всех средах биосферы. Тогда как кислород, водород, углерод и азот находятся во всех биосферных средах в биологически неисчерпаемом количестве, фосфор является одним из главных лимитирующих факторов биомассы как в отдельно взятых экосистемах, так и в биосфере в целом.

Чтобы понять, почему роль фосфора столь уникальна, интересно сравнить его с серой, еще одним столь же важным биогенным элементом, который, тем не менее, лимитирующей роли в биосфере никогда не играет. Кларки серы (0,14% вес.) и фосфора (0,07% вес.) в верхней части земной коры соотносятся как 2 : 1. Примерно то же соотношение мы видим в растительности суши: кларк S в растениях по разным оценкам от 3,4 до 4,8% вес. кларк P – 2% вес. S : P = от 1,7 : 1 до 2,4 : 1. То же самое мы видим и для морской биоты. Известное весовое соотношение главных биогенных элементов (соотношение Редфилда) для морских фотосинтетиков колеблется по разным оценкам S : P от 0,7 : 1 до 3,5 : 1. Несмотря на то что кларки и биофильность [12] этих элементов очень близки, сера никогда, кроме очень специфических случаев, не бывает лимитирующим фактором в биологическом круговороте.

Причина здесь в растворимости фосфатов и сульфатов. Среднее содержание сульфатной серы в морской воде 890 мг/л, неорганического фосфора 0,05 мг/л, что дает разницу более чем в четыре порядка. Основной высаживающий катион для обоих анионов – Ca²⁺. В океане кальций высаживает фосфат, поддерживая его крайне низкую концентрацию в воде, но не высаживает гипс (предельная растворимость гипса в морской воде составляет 2,7 г/л). Кроме того, фосфат удаляется из воды соосаждением с гидроксидами железа. Низкие концентрации фосфата в морской воде делают фосфор лимитирующим элементом, а серу – биологически избыточной по отношению к живому веществу океана. Ангидритовые и гипсовые толщи могут быть только эвапоритами², а фосфориты, как океанического генезиса, так и платформенного, эвапоритами не бывают, а могут быть лишь хемогенным или биохемогенным морским осадком. Прямым следствием разницы в морских концентрациях является тот факт, что сера является циклирующей солью, а фосфат – нет. Поток фосфора с океана на сушу с осадками слабее потока серы в той же пропорции, что и их концентрации в морской воде, то есть на четыре с лишним порядка. Следовательно, наземные экосистемы получают фосфор только при дезинтеграции подпочвен-

ных пород, а серу – еще и как циклирующую соль с дождевыми водами и из подпочвенных пород. Причем поступление серы из подпочвенных пород благодаря более высокому кларку и в кристаллических, и в осадочных породах идет приблизительно в два раза более интенсивно, чем в случае фосфора.

Особенность циклирующих солей в том, что их перенос из океана на сушу зависит от удаленности конкретной территории от океана. Но никакой зависимости удельной биомассы наземных ценозов от поступления циклирующих солей (= удаленности от океана) не известно. Следовательно, поступление серы как циклирующей соли в наземные экосистемы не играет решающей роли. Даже без поступления циклирующей серы она не окажется дефицитным элементом. То же можно сказать и про другие биофильные элементы. Это касается и калия, имеющего высокий кларк и в магматических, и в осадочных породах. Примером наличия указанной зависимости может служить йод, дефицитный в удаленных от океана регионах, но этот пример касается в основном высших животных.

Таким образом, единственным значимым источником поступления фосфора в наземные экосистемы является подпочвенная дезинтеграция подстилающих пород.

Фосфор как лимитирующий фактор почвообразования

Важно задаться вопросом: что такое почва с биогеохимической точки зрения? Точка зрения, что почва – это промежуточное звено между материнскими породами и живым веществом суши, или что это среда разложения мертвой органики редуцентами, верна, но не достаточна.

Первые растения вышли на сушу в силурийском периоде. Понятно, что почвы в их современном виде появились не сразу. На сегодняшний день самые древние гуминовые вещества зафиксированы в отложениях среднего карбона Подмосковья [15]. Не любая разлагающаяся растительная органика является почвой. Чем же отличается почва от просто гниющей органики? Ответ: гумусом. Литература, посвященная роли гумусовых веществ в функционировании современных экосистем, обширна, однако даже в таких работах, как [21, 22, 18], нет точного ответа на вопрос: в чем биогеохимическая роль лигнина как предшественника в процессах гумусообразования, и какова его роль в эволюции наземных фитосообществ? Роль почв в концентрировании фосфора хорошо известна, но нет ответа на вопрос: почему без лигнина фитосообщество не может существовать в принципе? Нами выдвигается идея, что главная эволюционная причина появления почв – острое противоречие между растениями и редуцентами. Между ними существует

² **Эвапориты** (от лат. *evaporare* — испаряю) — минералы и химические осадки, выпавшие из пересыщенных растворов. Представляют собой продукты испарения воды путем ее постепенного сгущения в полузамкнутых и замкнутых водоемах под воздействием солнечной радиации. Эвапориты могут быть как жидкими (седиментационные рассолы), так и твердыми (осадки минералов).

конкуренция за органическое вещество. Редуценты стремятся *полностью и максимально быстро* разложить мертвую органику, извлекая из нее энергию (полное разложение до CO_2 и H_2O), а часть потратить для построения своих тканей. Еще В.И. Вернадский высказал мысль, что живое вещество (= трофическая цепь) стремится к максимально возможному увеличению своей биомассы. Именно так действует и отдельный сегмент живого вещества – трофическая цепочка редуцентов: максимально использовать мертвую органику как источник энергии и вещества. Иначе говоря – максимально полно разложить мертвые растительные ткани. И если биомасса редуцентов возрастает без ограничения, то и скорость разложения мертвого субстрата возрастает неограниченно. *Редуценты не способны сами ограничить свою биомассу, нужен внешний ограничивающий фактор.*

Почвенные грибы расщепляют органику не полностью, довольствуясь расщеплением крупных молекул на фрагменты или простые органические соединения [14]. Бактерии довершают дело, полностью разлагая эти соединения до воды, углекислоты и молекулярного азота.

Система устойчива в том случае, если запас мертвой органики непрерывно пополняется за счет фотосинтетиков. Если пополнение прекратится, то редуценты очень быстро минерализуют всю органику «до нуля» и перестанут существовать сами. Экосистема самоуничтожится из-за энергетических потерь. Но что же мешает растениям вновь и вновь создавать органику? На выходе редуценты дают воду, углекислоту и молекулярный азот. Однако в остатке будут еще фосфаты, сульфаты и макрокатионы. Проблема растений при разложении органики редуцентами «до нуля» в том, что и макроионы (в том числе фосфаты), и микроэлементы при этом оказываются в легкоподвижном виде в грунтовой воде и легко выносятся за пределы наземных ландшафтов в речную сеть и далее в океан. Верхний слой грунта, из которого растения берут фосфор, быстро истощается и по фосфору, и по другим минеральным солям. Фотосинтетики в отсутствие минеральных солей не могут создать новую органику, и система как целое самоуничтожается.

Таким образом, жизненная стратегия растений обратна стратегии редуцентов и состоит в том, чтобы органика не уничтожалась «до нуля», а сохранялась в некотором количестве как резервуар фосфора и других солей. Известно много примеров того, что растения извлекают из почвы или среды готовые органические молекулы, используя их для построения тканей. Крайними примерами тут служат бесхлорофилловые растения-паразиты, строящие свои ткани целиком за счет готовых «внешних» органических веществ, и, с другой стороны, растения, выращенные методами гидропоники, то есть без участия почвы и внешних

источников органики. В целом растения, имея налаженный механизм фотосинтеза, не нуждаются во внешнем поступлении органических веществ. Тем не менее, растения оказываются конкурентами почвенных редуцентов за органическое вещество как буфер для хранения минеральных солей, прежде всего фосфата. Сформулируем нашу идею так: *эволюционный ответ растений на давление редуцентов состоит в том, чтобы сделать почву трудноразложимой для любых редуцентов, но при этом так, чтобы она оставалась резервуаром для извлечения фосфата.* Именно эту функцию выполняет лигнин, трудноразложимый для редуцентов почв. Наиболее трудноразложимое, консервативное ядро лигниновой макромолекулы содержит многочисленные бензольные ядра, несущие в качестве заместителей гидроксильные, метоксильные ($-\text{OCH}_3$) и карбоксильные группы [21]. Они, особенно гидроксильные группы, и могут связывать фосфатные группы через кислородный мостик.

Важнейшая функция почвы, а именно ее гумусовой части, – это фиксация микроэлементов и минеральных солей в полуподвижную форму. Гумус – это как раз и есть комплекс на основе лигниновых производных, фиксирующий и органику, и фосфаты, и биологически важные металлы. Лигнин в живых тканях не выполняет никакой необходимой функции. В морских растениях его вообще нет. Из этого можно было бы предположить в нем опорную функцию. Но лигнин, в отличие от целлюлозы, не образует длинных полимерных цепей, значит, он не обладает какими-то особыми свойствами, улучшающими опорную функцию тканей. Эту функцию выполняет целлюлоза. Тем не менее, древесная ткань состоит из комбинации целлюлозы и лигнина. Лигнин здесь является лишь нефункциональным наполнителем. Его функция проявляется уже после гибели растения. Все это подтверждает тезис о том, что *лигнин – это эволюционный ответ* высших сухопутных растений на работу почвенных редуцентов, именно он отличает современные почвы от первых аналогов почв в среднем палеозое. Процесс гумификации происходит в почве в процессе полимеризации разлагаемой редуцентами ароматической органики. И именно не гидролиземый лигнин образует те «кирпичики», из которых формируются сложные гуминовые комплексы [22]. Морские растения такого эволюционного «лигнинового ответа» не дали и не могли дать. Это можно видеть на морских побережьях, заваленных метровыми слоями гниющей ламинарии. При этом никакой почвы такая гниющая органика не образует и образовать не может: ее разложение редуцентами происходит «до нуля», полностью.

Подытожим: безлигниновое наземное фитосообщество быстро деградирует по следующей схеме: при первичном заселении растения извлекают фосфор из

подстилающих пород → при отмирании растения редуценты минерализуют органику → высвободившиеся соли выносятся из системы → повторение цикла быстро истощает доступные запасы фосфора в подпочвенных породах → общая биомасса экосистемы быстро деградирует → восстановление экосистемы становится возможным только после эрозии и сноса истощенного верхнего слоя пород.

Безлигнинная растительность суши, по нашему мнению, могла существовать только в отдельных специфических условиях. Это те ландшафтные условия, в которых преобладают процессы геохимической аккумуляции фосфатов. В таких ландшафтах наличие лигнина не играет роли: фосфат и так не выносятся из системы. Это болота, лагуны, замкнутые котловины без промывного режима в подстилающих породах. Как раз такой и представляется первая наземная растительность среднего и позднего палеозоя. Заселение наземными растениями водоразделов в то время было невозможно как раз по причине «фосфорного дефицита», а не из-за удаленности от «привычной» водной среды.

Современные наземные экосистемы гораздо более эффективны, чем морские. Если в среде открытого моря концентрация и «буферизация» фосфора невозможна нигде, а жизнь концентрируется в местах выхода восходящих, богатых фосфором течений (апвеллингов), то, в соответствии с принципом Вернадского о максимизации количества живого вещества, наземные экосистемы достигли гораздо большей эффективности. Это выражается и в цифрах: $738 \times 10^{15} \text{ г С}_{\text{орг}}$ в растениях суши против $1,7 \times 10^{15} \text{ г С}_{\text{орг}}$ во всей биоте моря [6] (при том, что площадь суши – это лишь треть поверхности Земли). Поскольку и там, и там главным лимитирующим фактором биомассы является фосфор (наряду с биодоступным азотом), это соотношение по сути дела показывает, сколько фосфора могут удерживать экосистемы моря и суши. Лишь в арктических зонах суши и океана и пустынных регионах суши лимитирующими факторами являются физические параметры среды (температура, увлажненность).

Итак, наша идея о роли лигнина имеет следствием интересный вывод, упущенный из виду в палеонтологии: *основной проблемой при заселении растениями суши был «фосфорный дефицит»*, преодоленный лишь с появлением лигниновых почв как эволюционного ответа на давление редуцентов.

Уместен вопрос: почему именно лигнин? Ведь существует множество трудноразложимых органических веществ. Из этого вытекает и второй вопрос: какими свойствами должно обладать органическое вещество, буферизирующее фосфор? Далеко не любое трудноразложимое вещество годится. Если мы возьмем современный хвойный лес как пример фитосообщества с большой удельной фитомассой на едини-

цу площади, то лигнин в живых тканях составляет 15–20% массы. Остальные 80–85% – это обычная быстроразложимая органика. И выигрыш только от плохой разложимости был бы невелик: скорость деградации экосообществ замедлилась бы на 1/7, но итог был бы тот же. Значит, лигнин концентрирует не только собственный фосфор растения (его в чистом лигнине нет, но есть в клетках, его синтезирующих), но и весь тот фосфор, который высвобождается в процессе разложения остальной органики. Именно это мы и видим: еще в первой половине XX века выяснилось, что фосфор концентрируется именно в гумусовой компоненте почв. Это отмечал еще академик В.Р. Вильямс в 1940-х годах: «Концентрация фосфора в почве является наиболее твердым признаком, позволяющим отличить почвенные образования от горной породы» [4]. Причем концентрация фосфора увеличивается в 5–7 раз по сравнению с кларком для растений суши, что как раз и соответствует полному или почти полному захвату высвобождающегося фосфора. Значит, мы можем констатировать: *функция почвы состоит не просто в захвате свободных фосфатов из почвенных растворов, но в захвате по возможности полному*. Там, где захват не полный, произойдет более или менее быстрая деградация сообщества. Предельная удельная биомасса на единицу площади в природных экосистемах как раз и определяется нормой потерь фосфора этой системой. Чем меньше потери, тем больше удельная биомасса. Конечно же, надо сделать ту поправку, что предельная биомасса может не достигаться, если преобладают другие лимитирующие факторы (температура, влажность, освещенность).

Поскольку гумификация органики в почве – это процесс складирования органики и минеральных веществ в интересах именно растений, растения должны как-то управлять этими запасами. Представляется логичным, что для складирования эволюционно выбраны вещества, меняющие свою растворимость в зависимости от кислотности среды. В кислой среде гуминовые кислоты не растворимы. Корневые выделения растений (уксусная и другие органические кислоты) подавляют миграцию гумусовых кислот, делая их неподвижными [21]. Период весеннего увлажнения снимает кислотность и, вкупе с прекращением выделений кислот в почву растениями, вызовет преобразование и высвобождение части гумуса и изъятие его корневой системой растений.

Таким образом, гумус является важнейшим промежуточным резервуаром фосфора для живой растительной биомассы. Какова степень складирования минерально-органических запасов почвами? По-видимому, избыточная, а иногда даже сильно избыточная. Проиллюстрируем разные степени этой избыточности. Возьмем экосообщество с очень высокой удельной биомассой на единицу площади – экватор-

риальный лес. Общеизвестно, что удельная биомасса такого леса (45 кг/м^2) лимитируется солнечным светом, а не запасами органики или минеральных веществ (фосфатов в том числе) в почвах. В экваториальном лесу насчитывают до 8–10 вертикальных ярусов, улавливающих свет до такой степени, что освещенность на уровне почвы составляет 0,2% от исходной. Круговорот органики в экваториальном лесу идет очень быстро, опад минерализуется быстро, фосфор и минеральные соли вовлекаются в короткий цикл максимально полно. Поэтому отношение удельной живой растительной массы к удельному количеству гумуса высокое, в предельном случае полноценной почвы может вообще не быть, присутствует лишь быстро разлагаемая подстилка. Тем не менее, фосфор не теряется благодаря присутствию лигнина в опаде.

Примером сильной избыточности почвенных запасов являются наши степные черноземы. Гумусовый слой достигает там двух и более метров при очень небольшой удельной биомассе наружных частей растений (порядка $2,3 \text{ кг/м}^2$). При этом солнечный свет не является лимитирующим фактором (широколиственные леса на той же широте при той же освещенности могли бы дать биомассу в 30 кг/м^2). Лимитирующим фактором в данном случае является увлажнение. Но, как бы то ни было, мы видим двухметровый гумусовый слой складированных запасов органики и минеральных веществ. Существенным моментом тут является то, что гумус образуется не только и не столько благодаря опадению наружных частей растений, а за счет отмирания корней. Благодаря такой мощной и глубоко простирающейся корневой системе фосфор мобилизуется из более мощного слоя коренных пород, следовательно, общие запасы фосфора в почвенном слое в несколько раз выше, чем, к примеру, в широколиственных лесах. Но при этом эти запасы распределены по большему слою почвы, и гумус в среднем беднее фосфором, чем гумус широколиственных лесов. Таким образом, в данном примере мы видим максимальную избыточность запасов фосфора и минеральных солей.

Слой и время мобилизации

Как было сказано выше, основной источник фосфора в природных наземных экосистемах – это подпочвенная дезинтеграция пород. И тут для правильного понимания приходится ввести новые понятия – «слой и время мобилизации элемента». Эти две важнейшие величины показывают, с какой скоростью тот или иной элемент из подпочвенных пород вовлекается в экосистему, включающую не только живое вещество, но и почву как буфер этого элемента. Первая величина показывает тот слой свежих, не выщелоченных пород, который при полном извлечении обеспечит экосистему данным элементом. Вторая величина сопряжена

с первой и показывает время, за которое происходит полная дезинтеграция такого слоя. В табл. 1 приведены данные по мобилизации элементов из подпочвенных пород в почву и живую фитомассу. Выбран регион Среднерусской полосы (лиственные леса на бурых почвах) с равнинным рельефом, исключая интенсивную эрозию. Поэтому считаем, что вовлечение элементов в биологические процессы происходит исключительно за счет подпочвенной дезинтеграции пород. Зная кларки элементов в растениях [23] (колонка 2), вычисляем для них запас ряда элементов на единицу площади для высокопродуктивной экосистемы лиственного леса (30 кг фитомассы на 1 м^2 [26]): (колонка 3). Зная количественные соотношения элементов в гумусовой части почв [5, 33] (колонка 4), вычисляем запасы элементов для типичной бурой почвы (колонка 5), считая запас органического углерода в ней 15 кг/м^2 . Колонка 7 показывает, во сколько раз связанный в гумусе запас элемента превышает его запас в живых растениях. Это отношение выражает «степень буферизации» элемента почвой. Слой мобилизации (колонка 9) показывает, из какого слоя подпочвенных пород при соответствующих кларках [11] надо полностью извлечь весь запас элемента, чтобы обеспечить наличное содержание этого элемента в гумусовой части почвы + в растениях (для подсчета в колонке 8 взял кларк для смеси глины и песка в пропорции 1 : 1).

Понятия «слой мобилизации» и «время мобилизации» до настоящего времени не применялись в биогеохимии. Вместо них традиционно используются различные коэффициенты накопления. По своей сути «слой мобилизации», как и коэффициент биологического поглощения, показывает степень накопления того или иного элемента относительно субстрата. Но K_B – это отношение, а «слой мобилизации» считается в абсолютных значениях (см. табл. 1). И, что более важно, «слой мобилизации» считает запас в почве + живом веществе относительно подстилающих пород. При таком подходе запасы почвы вместе с запасами в живом веществе считаются единым резервуаром вовлеченных в биологический цикл количеств элемента, тогда как при оперировании показателем K_B почвенные запасы либо вообще не учитываются (если K_B рассчитывается относительно подстилающих пород), либо противопоставляются запасам в живом веществе (если K_B рассчитывается относительно почвы). Такой подход неудовлетворителен, поскольку маскирует функционирование почвы и живого растительного вещества как единого целого.

Последняя колонка в таблице показывает время мобилизации (обратно пропорциональное слою мобилизации) при подпочвенной денудации 20 мм/1000 лет , оцененной с учетом твердого и растворенного выноса стоком рек, деленного на площадь их водосбора (подробнее об этом в следующем разделе). Сходные

Запасы и мобилизация элементов из подпочвенных пород в почву и живую фитомассу для типичного природного ландшафта среднерусской полосы, лиственного леса на каштановых почвах (Исходные данные для вычислений взяты из [5, 11, 23, 26, 33])

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Элемент	Кларк в растениях, мкг/г	Растения (лес с биомассой 30 кг/м ²), запас элемента, г/м ²	Кларк в почвах, мкг/г	Отношение элемента к углероду в гумусе	Запас элемента в темно-каштановых почвах при запасах углерода 15000 г/м ²	Отношение запаса в почвах к запасу в растениях	Кларк в смеси 1 ч. глина + 1 ч. песок, %	Слой мобилизации из породы, см	Время мобилизации, тыс. лет
Биогенные элементы с источником поступления из подпочвенных пород									
Ca	15000	450	13700	0,685	10275	23	2,5	15	1,8
K	11000	330	13600	0,68	10200	31	2,25	17	2,0
S	4800	144	850	0,0425	637,5	4	0,27	9	1,0
Mg	3200	96	6300	0,315	4725	49	1,38	13	1,5
P	2000	60	800	0,04	600	10	0,07	32	3,8
Mn	240	7,2	850	0,0425	637,5	89	0,08	30	3,5
Fe	200	6	38000	1,9	28500	4750	3,96	27	3,2
Zn	50	1,5	60	0,003	45	30	0,0052	32	3,8
Cu	10	0,3	25	0,00125	18,75	63	0,0034	20	2,4
Mo	0,6	0,018	1,2	0,00006	0,9	50	0,00015	22	2,6
Биогенные элементы, поступающие из атмосферы или как циклирующие соли									
C	454000	13620	20000	1	15000	1,1	1,2	46*	5,5*
Cl	2000	60	100	0,005	75	1,3	0,072	4*	0,5*
Na	1200	36	6300	0,315	4725	131	1,2	15*	1,7*
Br	4	0,12	5	0,00025	3,75	31	0,0053	3*	0,3*
Элементы, проявляющие биогенные свойства в некоторых таксонах растений суши									
Si	3000	90	33000	1,65	24750	275	29	3	0,4
B	25	0,75	10	0,0005	7,5	10	0,006	5	0,6
Ni	2	0,06	40	0,002	30	500	0,0039	28	3,4
Cr	1,8	0,054	200	0,01	150	2778	0,0066	84	10,0
Co	0,5	0,015	8	0,0004	6	400	0,0016	14	1,7
Se	0,05	0,0015	0,4	0,00002	0,3	200	0,000023	48	5,8
Элементы без выраженной биохимической функции									
Al	300	9	71000	3,55	53250	5917	7,4	27	3,2
Sr	40	1,2	300	0,015	225	188	0,024	35	4,1
Ti	32	0,96	4600	0,23	3450	3594	0,42	30	3,6
Ba	22	0,66	500	0,025	375	568	0,042	33	3,9
F	3,5	0,105	200	0,01	150	1429	0,046	12	1,4
V	1,5	0,045	100	0,005	75	1667	0,0097	29	3,4
Элементы с токсическим действием при высоких концентрациях									
Hg	0,012	0,00036	0,06	0,000003	0,045	125	0,0000069	24	2,9
Bi	0,06	0,0018	0,2	0,00001	0,15	83	0,000029	19	2,3
Ag	0,03	0,0009	0,05	0,0000025	0,0375	42	0,00001	14	1,7
Cd	0,5	0,015	0,35	0,0000175	0,2625	18	0,000087	11	1,3
Sn	0,25	0,0075	4	0,0002	3	400	0,00035	32	3,8
Sb	0,005	0,00015	1	0,00005	0,75	5000	0,00018	15	1,8
Pb	2,5	0,075	12	0,0006	9	120	0,0014	24	2,8
As	0,12	0,0036	6	0,0003	4,5	1250	0,00082	20	2,4

* Для «циклирующих» солей мобилизация из пород не является показательной.

результаты по скорости денудации дают и другие авторы, например [7], для равнинных территорий Северной Америки.

Из таблицы видно, что время мобилизации ни для одного элемента не превышает 10 тыс. лет. А это как раз максимально возможное время существования почв после отступления последнего ледника (10,5 тыс. лет). Максимальное время мобилизации – у хрома, который ведет себя как остаточный элемент, зафиксированный в труднорастворимом хромите. Подавляющее большинство элементов укладывается в более узкие рамки – 3,8 тыс. лет. У биогенных элементов время мобилизации и не может быть близким к 10 тыс. лет, поскольку происходит непрерывная потеря элементов системой. Степень этой потери как раз и можно оценить, сравнивая время мобилизации со временем существования почв на данной территории (10 тыс. лет). Нам все это принципиально важно с точки зрения биогеохимии фосфора, чтобы оценить фоновую скорость вовлечения фосфора в наземные экосистемы. Для фосфора потери составили около 60% всего вовлеченного за это время фосфора: $(1 - (3800/10000)) \times 100\%$. Для сравнения, у серы потери составили 90%.

Для самопроверки можно вычислить среднестатистические потери фосфора почвами и сравнить их с натурными наблюдениями. Для взятого нами ландшафта наблюдаемые потери составят около 1000 г Р/м^2 за 10 тыс. лет (60% от вовлеченного за это время), что равно $0,1 \text{ г/(год} \times \text{м}^2)$ [16].

Среди главных биогенных элементов (за исключением циклирующих и атмосферных) у фосфора самый мощный «слой мобилизации» и, что то же самое, самое длинное «время мобилизации». Это подтверждает нашу мысль, что фосфор наиболее эффективно удерживается системой. А тот факт, что у фосфора и серы самые высокие отношение запаса в живом веществе к запасу в гумусе (соответственно 10 и 4), прямо говорит о том, что эти элементы наиболее полно извлекаются живым веществом из гумуса. Однако надо еще учесть, что сульфаты в почве гораздо лучше растворимы, чем фосфаты, поэтому сера хуже задерживается в гумусе и вымывается почвенными водами. Поэтому не серу, а именно фосфор надо считать лимитирующим фактором.

Цикл фосфора в агроландшафтах

Главнейшая особенность геохимического цикла фосфора в агроландшафтах состоит в его разомкнутости. Отторжение фосфора с урожаем по последствиям равнозначно потерям фосфора с грунтовыми водами. Это известно со времен подсечного земледелия, когда почвы быстро истощались после примерно десятилетнего использования. Более развитая система земледелия предусматривала возвращение части изъятого

фосфора и азота с навозом сельскохозяйственных животных, а калийные удобрения получали сжиганием леса и получением поташа. Урожайность при этом была невысокой. В XX веке, примерно с 1940-х годов, перешли к форсированному земледелию, при котором потери фосфора восполняли фосфатными удобрениями, вначале в виде торфа, а после чисто минеральными. Избыточное внесение фосфора тут же приводит к тому, что удельная биомасса (урожайность) возрастает, и лимитирующими факторами становятся вместе с фосфором также калий, азот и сера. Сера в списке дефицитных элементов никогда не упоминается по той причине, что сульфат входит в состав ряда калийных и аммонийных удобрений (сульфат калия, сульфат аммония); и о том, что сера при форсированном земледелии тоже дефицитный элемент, просто «забыли». Все остальные главные биогенные элементы (С, Н, О) продолжают оставаться в статусе «неисчерпаемых». Благодаря этой триаде: НКР (на самом деле НКРS) урожайность может быть огромной. При этом благодаря гидропонике в сочетании с искусственным освещением, лимитирующим фактором становится максимально возможная скорость роста растений. Количество минеральных удобрений, вносимых под агрокультуры, возросло в десятки раз. Если в 1980-х годах в СССР вносилось порядка 20 кг/га (сумма НКР в расчете на действующие вещества), то в Нидерландах в 2010-х годах – 570 кг/га [19].

Страны очень неравномерно используют минеральные удобрения. Так на 2020 год население Африки (1,38 млрд чел.) практически совпадало с населением Китая (1,41 млрд чел.). При этом использование минеральных удобрений различается в 7 раз в пользу КНР (58 млн т. в год против 8 млн т [30]). Это означает, что в Китае пахотной земли меньше, чем в Африке, они вынуждены форсировать урожай, внося гигантские количества удобрений. Но также это означает ускоренное истощение африканских почв [31], опустынивание, потенциальный голод. Африканский континент, имея крупнейшие месторождения фосфатов в Марокко, только добывает их, переработка происходит в странах-импортерах в Европе и США. В результате из-за транспортного плеча цена на удобрения в Африке в 2–6 раз выше, чем в Европе [31], что для бедных стран катастрофично.

На проблему нехватки удобрений накладывается тяжелейшая проблема эрозии почв. Среднемировая величина потерь фосфора на сельхозугодиях из-за эрозии гумусового слоя – $5,9 \text{ кг Р/га}$ в год (Австралия – 0,9; Европа – 1,2; Бразилия, Индонезия, Центр. Америка, Индия – 5–10; Китай, Эфиопия – 20) [31]. Тяжелая ситуация в Китае связана с особенностью почв, заложённых на легко размываемых лёссах.

Но даже если рассматривать благополучные регионы, вся система держится на интенсивном использо-

вании минеральных удобрений. Если ресурсы азота можно смело считать неисчерпаемыми (для производства аммиака нужны азот воздуха и метан), а ресурсы калия и серы достаточно велики, то запасы фосфора катастрофически малы. В 2011 году запасы крупнейших месторождений фосфоритов в Марокко были пересчитаны в сторону увеличения сразу в четыре раза [36, 37, 42]. До этого они оценивались в 35% мировых запасов. Теперь считается, что в Марокко сосредоточено 70% мировых запасов фосфоритов. Мировые запасы после пересчета составили 65000 млн т. руды. Общие мировые ресурсы стали 290000 млн т., включая и упомянутые запасы. Сразу же встал вопрос о корректности такого пересчета: ведь от результата зависит время исчерпания ресурса. Оценки такого исчерпания в разных источниках колебались от 50 лет до тысячелетий. Наиболее подробно вопрос разобран в [36]. Авторы статьи обнаружили в первоисточниках множество нестыковок. Для многих стран перепутаны тонны и кубические метры (разница в 2 раза), тонны руды перепутаны с тоннами так называемого «улучшенного концентрата», что дает разницу в 2–3 раза. Не учтен «коэффициент извлечения» руды, который в среднем в мире составляет 82%, а для марокканских месторождений принят как 95%. Главной же причиной появления новых цифр стало то, что все ресурсы (не рентабельные ныне, но могущие стать рентабельными в будущем) переписаны в запасы (рентабельные при существующих экономических условиях). Само по себе такое отождествление можно принять и согласиться с приведенными выше оценками запасов. После ряда пересчетов в [36] предложены три сценария исчерпания мировых запасов. Самый оптимистичный, предполагающий радикальное улучшение технологий добычи, улучшение землепользования по всему миру, нулевые техногенные потери, дает цифру 261 год (отсчет от 2011 года) при текущем уровне добычи в 350 млн т. руды. Средний сценарий (умеренный прогресс в технологиях и хозяйствовании) дал 215 лет. И самый пессимистичный, но и самый вероятный (оставить все системы хозяйствования без изменений) дал 137 лет, что соответствует 2148 году.

Существует также понятие «извлекаемые запасы», куда входят залежи, которые технически можно извлечь, но это не будет рентабельно даже в очень дальней перспективе. В качестве примера [36] приводит крупнейшее (7600 млн т. руды) месторождение Западное в США, рабочие залежи которого находятся на глубинах 305–9000 м. Также авторы пессимистично настроены к тезису об открытии новых месторождений в будущем: осадочный чехол планеты в поисках нефти пробурен очень густо, и новые открытия крайне маловероятны.

Однако даже сценарий, при котором исчерпание фосфора произойдет в середине XXII века, кажется

нам слишком оптимистичным. Приведем свои соображения. По прогнозу ООН население мира достигнет к 2100 году 10,5–11 млрд чел. И если считать, что добыча пропорциональна численности населения, то время исчерпания сократится примерно до 100 лет. Второй немаловажный факт состоит в том, что КНР полностью исчерпает свои ресурсы к 2041 году, США – к 2056, а Россия – к 2076 году [30]. С этого времени Марокко (+ оккупированная им с 1975 года Западная Сахара) будет единолично владеть практически всеми запасами доступного фосфора на планете. В таких публикациях, как [31], прямо указывается на жесткую политическую (= военную) борьбу за фосфатные ресурсы как вероятную реальность. В такой ситуации та часть мира, которая не будет допущена к ресурсам, окажется за гранью голода. Но даже если предположить, что мировая торговля фосфатами не будет ограничена, вступает в силу третье соображение. Причиной глобального голода может быть не полное отсутствие ресурса, а цена на него. Кратковременное повышение цен на фосфаты в 2008 году на 400% тут же вызвало голод в нескольких провинциях Индии с человеческими жертвами [35]. Тот же сценарий, только для большей части мира представляется практически неизбежным по мере возрастания монополии на сырье, при исчерпании нефтяных запасов в мире (= стоимость перевозки), при переходе к более бедным рудам.

В России на данный момент все фосфоритные месторождения переведены в резерв, обрабатываются только апатиты Кольского п-ова [10, 20, 30]. Запасы апатитов в мире невелики. Других источников фосфора нет. Особенность фосфора в том, что он очень равномерно распределен по всем типам осадочных, магматических и метаморфических пород и очень редко концентрируется. При кларке в 0,07–0,08% масштабная добыча его путем обогащения из каких-либо пород, кроме апатитов и фосфоритов, представляется нереальной.

В настоящее время человечество с большой скоростью бездумно рассеивает те небольшие запасы фосфатов, которые имеются. Общая схема рассеивания: добыча и внесение в почву в виде удобрений → потери в речную сеть с дождевыми водами; отторгнутый с урожаем фосфор перемещается в город и после очистки сточных вод также попадает в речную сеть → фосфор попадает в мировой океан, где на какое-то время увеличивает морскую биопродуктивность в устьях рек → с отмершей органикой падает в толщу океанической воды, минерализуется и частично рассеивается по водной массе океана, частично высаживается кальцием, теряясь в морских осадках. Не высаженная часть возвратится на поверхность в зонах апвеллинга после большого круговорота морской воды через 10–20 тыс. лет. Таким образом, всего лишь

через 60–80 лет человечество столкнется с тяжелой проблемой.

Известно, что современные речные воды в среднем по миру выносят в океан в два раза больше фосфора, чем в первой половине XX века: 31 млн т/год против 17 млн т/год [24]. Нет сомнений, что избыточные 14 млн т/год – это техногенная составляющая, примерно равная природной, что хорошо согласуется с оценкой техногенного вовлечения фосфора в биосферу: 14–16 млн т/год [28, 40]. Отсюда видно, что *фосфор техногенного происхождения не фиксируется в наземных условиях ни в одном масштабном процессе* и весь переносится в океан. Появились даже сообщения об увеличении живой биомассы в мировом океане [24]. Надо отметить, что биомасса океана, так же как и биомасса суши, определяется динамическим равновесием между поступлением и потерями фосфора живым веществом. Прекращение использования удобрений с исчерпанием запасов фосфоритов приведет к тому, что биомасса океана вернется к прежнему значению, соответствующему природному потоку. Сюда же надо отнести явление, описанное ниже, а именно – зафосфачивание почв. Оно характерно для западноевропейского экстенсивного земледелия и также должно рассматриваться в терминах динамического равновесия как временный резервуар. При прекращении интенсивного вноса удобрений агросистема вернется к фоновым показателям в течение одного-двух десятков лет. А весь излишний фосфор быстро рассеется в толще океанической воды. Поэтому надежды на увеличение морской добычи в постфосфорный период хозяйствования безосновательны.

Фосфорная катастрофа: возможно ли ее избежать?

В не нарушенных природных наземных экосистемах потери фосфора возобновляются за счет подпочвенных горных пород. То есть для устойчивого длительного существования такой экосистемы скорость подпочвенной дезинтеграции горных пород должна быть сбалансирована с потерями фосфора экосистемой через вынос в речную сеть.

В случае, если на сельскохозяйственных почвах пополнение фосфором идет только за счет подпочвенной дезинтеграции, лишь часть этого фосфора может быть отчуждена, поскольку потеря фосфора с почвенным стоком все равно будет иметь место.

Приведем наши вычисления. Оценить скорость подпочвенной дезинтеграции можно по общей скорости денудации (табл. 1). Ее можно вычислить по отношению общего стока (твердого и растворенного) реки к площади ее водосбора. Такие данные многократно публиковались для разных регионов мира. Ориентировочное усредненное значение по миру – 135 т/км² в год или 50 мм за 1 тыс. лет [7]. Основные сельскохозяйст-

венные площади находятся на плоских равнинах, где модуль стока существенно ниже. Мы можем ориентироваться на данные по бассейну Волги и данные по равнинам США, в обоих случаях скорость денудации оценивается в 20–22 мм за 1 тыс. лет. Зная, что среднее содержание фосфора в нетронутых осадочных породах (мы взяли пески и глины в равной пропорции) составляет 0,07% [11], мы можем оценить годовое вовлечение фосфора в экосистему на единицу площади. Это около 38 кг/(год×км²). Нынешний мировой фонд сельскохозяйственных земель оценивается в 50 млн км² (из них пашня 19 млн км²), и вряд ли он может быть существенно увеличен в будущем. Таким образом, отчуждение фосфора без деградации почв не может превышать общемировой величины в $1,9 \times 10^{12}$ г Р/год. Причем в эту величину входит и потеря фосфора через речную сеть. Допустим, эти потери составят треть от общего отчуждения фосфора. Остается $1,2 \times 10^{12}$ г Р/год. Отсюда можно рассчитать, сколько человек предельно может прокормиться при таком типе хозяйствования. Физиологическая норма взрослого человека (800 г сырой пищи в день) соответствует 180 кг сухой массы в год. В пересчете на чистый фосфор это 360 г Р в год. Для сравнения: в [35] приведены такие величины: 1,8 кг добытого фосфора на 1 человека в год при условии перехода на вегетарианство, а для не вегетарианца расход ныне в два раза выше, при этом лишь 1/5 добытого фосфора употребляется непосредственно с пищей. Таким образом, если взять наименьшее возможное значение в 360 г, то в пересчете на взрослое население Земля может прокормить 3,3 млрд человек. С учетом возрастного коэффициента (дети едят меньше) – около 4 млрд чел. К этой оценке можно добавить еще примерно 1,5–2,0 млрд сельского населения, которое использует неотчуждаемый урожай. Итого: 5,5–6 млрд чел. Эта идеальная, излишне оптимистичная цифра была превышена еще в 2000 году. Для сравнения: в 1946 году добыча фосфоритов составляла лишь 2% от нынешней (данные за 2016 год). Можно считать, что до 1946 года человечество не восполняло потери фосфора, калия и азота минеральными удобрениями и не могло форсировать урожайность почв. При этом население планеты составляло 2,4 млрд, из которых большая часть (74%) были сельскими жителями (в СССР в 1950 году сельским была ровно половина населения). Соответственно, лишь 600 млн чел. городского населения питалось за счет отчуждаемого урожая. Для хозяйствования без применения минеральных удобрений это уже был предел возможностей. Голод во многих странах на протяжении всей первой половины XX века, а в ряде стран и во второй половине века привел человечество ко все более интенсивному использованию химических удобрений.

Прогнозы демографов в ближней перспективе (9,3 млрд чел. к 2050 году), и в дальней (11 млрд чел.

к 2100 году) рисуют нам безрадостную картину. Примерно к этому времени запасы фосфоритов будут исчерпаны или недоступны по политическим/экономическим причинам. Хотя рост населения таких стран, как Китай и Индия, пройдет пик численности уже к 2050 году, после чего начнется снижение численности до 1 млрд в Китае и 1,5 млрд в Индии к концу века, это намного превышает возможности сельского хозяйства этих стран. Но гораздо более тяжелая ситуация сложится на Африканском континенте. Здесь демографы прогнозируют взрывной рост населения в разных странах от 2,5 до 10 раз.

Таким образом, даже при абсолютно правильном хозяйствовании и при равномерном распределении запасов фосфора между странами ожидается массовый голод и вымирание для 5 млрд человек. Надо признать, что и такой сценарий слишком оптимистичен. В реальности идеального хозяйствования смогут достичь лишь отдельные дисциплинированные страны. Вымирание от голода и гибель в войнах за почвенные и минеральные ресурсы может достигнуть таких масштабов, что численность земного населения откатится к уровню 1946 года, то есть будет не более 2,5 млрд чел. При таком сценарии в течение 2–3 десятилетий погибнет 8–8,5 млрд чел.

Обеспеченность пахотной землей на душу населения

Это очень важный экономический показатель. Например (га/чел.): Канада – 1,7, Россия – 0,8, США – 0,6, Индия – 0,11, Китай – 0,08, Япония – 0,03. Сколько нужно земли, чтобы кормить население без химических удобрений и при этом без истощения почвы? Мы уже дали цифру, за которой начинается голод: 800 г пищи в день. Это соответствует 300 кг сырой органики в год. Из дореволюционных данных по «фоновой» урожайности в Российской империи: средний урожай был 7,5 центнера зерна с гектара. Итого, на человека будет нужно 0,4 га пахотной земли. Из этих цифр мы сразу видим, что не будет голода в Канаде, России, США. В Индии вымерет $\frac{3}{4}$ населения, в Китае с учетом демографического снижения населения – до 1 млрд чел. (обеспеченность пашней повысится до 0,12 га/чел), из них погибнет 700 млн. В Японии останется в живых один человек из 13.

А что будет с Африкой? Значительная часть Африканского континента ждет голодная смерть. Численность населения в Африке растет как нигде в мире. Например, в Нигерии ныне 207 млн чел. К концу века прогнозируют 795 млн чел. И это при быстром опустынивании и сокращающихся площадях под посев.

Разумеется, такие события неизбежны в том случае, если человечество в целом и отдельные страны в самом ближайшем будущем не предпримут экстраординарных мер.

Современное хозяйствование с точки зрения фосфорной геохимии

Как уже сказано выше, основная проблема современного хозяйствования заключается в разомкнутости коротких геохимических циклов фосфора в сельском хозяйствовании [34].

Как именно мы теряем фосфор? Отчуждаемый урожаем перемещается в города, после чего 10–15% его попадает на обычные мусорные свалки с недоеденной пищей, костями и прочим. А 85–90% съедается, превращается в фекалии и поступает в канализацию. Дальнейшие сценарии сильно различаются в разных странах мира. Практикуются разные способы и разные степени очистки сточных вод. Рассмотрим в качестве примера крупный европейский город, например Москву или Санкт-Петербург. В Москве канализационные воды перерабатываются на Люберецкой и Курьяновской станциях аэрации (из расчета канализационных стоков 137 л/чел. в сутки). При населении 13 млн чел. это 1,8 млн м³ стоков в сутки. На первой стадии очистки в анаэробных условиях органика подвергается кислому брожению, распадаясь на органические кислоты, частично до углекислоты и воды. Фосфаты в основном переходят в раствор. На втором этапе происходит дальнейшее преобразование материала, теперь уже в аэробных условиях. В него подселяется так называемый активный ил – широкая группа аэробных микроорганизмов, использующая исходную смесь в качестве пищевого субстрата. При этом часть органики минерализуется до CO₂ и H₂O, а большая часть идет на наращивание микробной биомассы. Поскольку все питательные вещества в смеси хорошо сбалансированы (по К, Р, N и органике), большая часть минеральных веществ (в том числе и фосфор) снова включается в микробное органическое вещество. При правильно выдержанной технологии в растворе фосфора остается мало. Далее этот «иловый осадок», являющийся нарощенной микробной биомассой, отделяется, сушится, прессуется. Оставшаяся вода облучается УФ, по некоторым технологиям озонируется или хлорируется и сбрасывается в речную сеть. В случае московских станций аэрации вода сбрасывается в р. Пехорку и через 28 км оказывается в Москве-реке. Далее все транзитом попадает в Каспийское море. Таким образом часть фосфора безвозвратно теряется в морских донных осадках.

Та часть фосфора, которая в высушенном виде превращается в брикеты, может: а) использоваться как удобрение (в РФ не используется); б) захораниваться; в) использоваться как топливо. Например, в настоящее время (2021 год) активно обсуждается проект использования брикетов в подмосковном цементном производстве (сжигание брикетов в качестве биотоплива при термических процессах производства

цемента). Ясно, что при таком использовании фосфат перейдет в основном в золу. Вот именно здесь и следовало бы перекрыть канал утечки фосфора и вернуть его в качестве удобрения на поля.

Вот данные лабораторий станций аэрации в Люберцах, СПб., Туле [13]: содержание фосфора в сухом веществе «илового осадка» составляет соответственно 2; 0,5–1; 2%. Кларк в растениях суши как раз 2 % P. Это означает, что при соблюдении технологии (полное преобразование органики фекалий в органику живого «активного ила») потери фосфора в растворенном виде будут минимальны. Низкие содержания фосфора в илах петербургских станций аэраций могут означать незавершенный микробиологический процесс и, следовательно, потери до половины фосфора в растворенном виде.

Второй, не менее мощный канал потери фосфора человечеством – это неумеренное форсированное использование фосфатных удобрений для увеличения урожайности. На рис. 1 приведены статистические данные по использованию удобрений (триада NKP в расчете на действующее вещество) в ряде стран в середине 1990-х годов.

Из графика видно, что, если не использовать удобрения вовсе, урожайность по зерновым окажется около 8–10 ц/га, снижаясь до нуля по мере истощения почв. Это хорошо согласуется с многолетними дореволюционными статистическими данными по урожайности в Российской империи: 7,8 ц/га при внесении удобрений

в среднем по стране около 6 кг/га [27]. При внесении удобрений в количестве 100 кг NKP/га урожайность будет около 40 ц/га. Но, чтобы увеличить ее до 80 ц/га, необходимо уже 570 кг/га, то есть не в два раза больше, а в 5,7 раза. То есть на таком максимуме две трети фосфора не включаются в урожай. Здесь фосфор (а также азот и калий) уже перестают быть лимитирующим фактором, и предел урожайности диктуется скоростью роста растений. Куда же девается «лишний» фосфор? Часть его фиксируется в почвах, особенно в богатых карбонатом кальция, образуя нерастворимый фосфат кальция. Это явление описано как «зафосфачивание почв». В европейских почвах зафосфачиванию подвержены 71% посевных площадей [31], в связи с чем в последние два десятилетия количество вносимых удобрений в Европе скорректировано и стало снижаться. Само по себе зафосфачивание еще не потеря фосфора, а лишь отложенный запас, медленно, десятилетиями извлекаемый растениями. Фосфат кальция такого генезиса можно приравнять к фосфату подстилающих пород. Но значительная часть фосфора теряется с дождевыми смывами, уходит с грунтовыми водами. Эти потери уже безвозвратны. Поэтому любое гиперфорсированное земледелие, использующее более 80 кг NKP/га следует считать варварским способом рассеивания и без того скудных мировых запасов фосфора. Цифра 80 кг/га взята как тот предел, после которого график урожайности начинает выполаживаться, что означает потери фосфора.

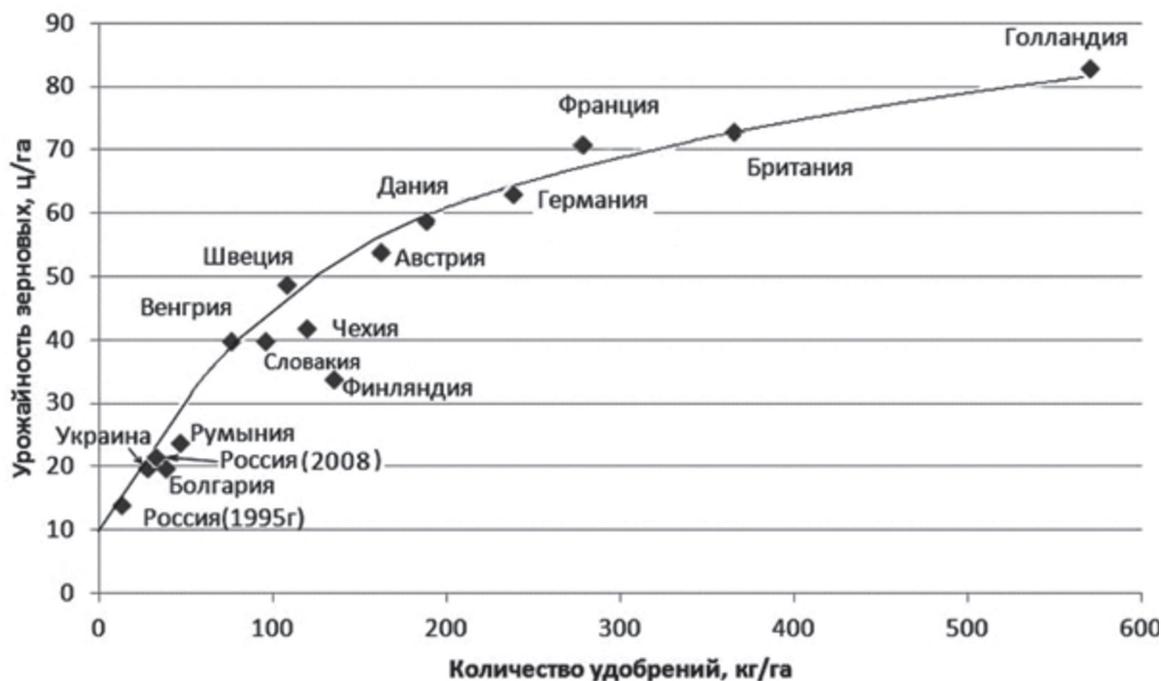


Рис. 1. Зависимость урожайности от количества внесенных удобрений (NKP). Статистические данные взяты из работ [19, 27]

Можно прикинуть, какая доля потерь фосфора приходится на потери с городскими сточными водами, а какая связана со смывами с полей. Для этого сравним количество внесенного фосфора с отчуждаемым с той же территории. Возьмем те же статистические данные. Венгрия: 4000 кг зерна с гектара при внесении в пересчете на чистый фосфор 6,7 кгР/га удобрений. В то же время 4000 кг зерна содержит 12,6 кгР. Россия (1995 год): 1300 кг зерна с гектара при внесении 1,18 кгР/га. При этом с урожаем отторгнуто 4,1 кгР/га. Можно констатировать, что в обоих примерах в 1990-е годы земля использовалась на истощение по фосфору. Такое могло происходить из-за неправильной пропорции между К, N и P. Пропорция эта разная для разных регионов, разных типов почв, разных агрокультур. Для России среднее соотношение приблизительно N : K : P = 1 : 0,9 : 1,5 [8]. При излишнем внесении K и N недостающий фосфор извлекался из гумусовых запасов самой почвы. Германия: 6280 кг зерна при внесении 15,4 кгР/га; отторгнуто с урожаем 19,8 кгР. Голландия: 8290 кг зерна при внесении 30,8 кгР/га; отторгнуто с урожаем 26,1 кгР/га. В последнем случае 15% фосфора уходит на зафосфачивание почв, либо теряется в речной сети. Сходные данные даются в [32, 35]. Вообще, баланс почвы по фосфору складывается из: а) подпочвенного выветривания; б) внесения удобрений; в) смыва в речную сеть; г) отчуждаемого урожая. Существенная часть мировых сельскохозяйственных земель имеет отрицательный баланс (от -4 до -19). В благополучных странах с нулевым балансом (Старая Европа, Австралия) сводить баланс получается значительным внесением удобрений. При отсутствии внесения минеральных удобрений баланс резко отрицательный по всему миру [31].

Из приведенных данных следует очень тревожный вывод: даже при достаточно высоком внесении фосфатных удобрений растения все равно изымают фосфор из гумуса. При этом внесенные удобрения могут частично смываться в речную сеть. И смыв тем больше, чем больше внесены дозы удобрения. Таким образом, при форсированном земледелии мы и теряем фосфор в речной сети и одновременно истощаем почву, хотя и медленно.

Главная доля потерь фосфора (85–100%) теряется при перемещении в города. Смывы с полей составляют в большинстве стран менее 20% потерь.

Фосфорные удобрения легкорастворимые и медленно растворимые

Принятая сейчас форсированная система хозяйствования опирается на быстрорастворимые фосфаты типа аммофоса, диаммофоса, монофосфата калия, суперфосфата, двойного суперфосфата. Они дают весьма высокие урожаи, но и большие потери фосфора «мимо

урожая» из-за ливневых смывов, просачивания в подпочвенные горизонты. Действие легкорастворимых удобрений длится не более чем 1–3 года, после чего необходимо новое внесение. В присутствии ионов кальция происходит «зафосфачивание почв» – переход в нерастворимый фосфат кальция в самих почвах или в подпочвенных горизонтах. Большая доля фосфора теряется и в процессе производства легкорастворимых концентрированных удобрений – до 30% P уходит в отходы производства. При производстве суперфосфата на 1 тонну продукта получается 5 тонн фосфогипса как бесполезного побочного продукта, к тому же содержащего 3% не извлеченного фосфора [35].

Другая группа удобрений – малорастворимые удобрения типа фосфоритной муки (фактически измельченной фосфоритной руды), костной муки. Урожаи не высокие, длительность действия таких удобрений растягивается на десятилетия. Качество почвы может ухудшаться из-за большой доли «пустой породы» (доля P₂O₅ в фосфоритной муке около 20–30%). Но с точки зрения рационального использования ресурсов именно при использовании «медленных» фосфатов потери фосфора минимальны. Сокращаются потери при производстве удобрений, исключается уход фосфора в смывах. Растения медленно, полностью забирают весь фосфор. Тот же эффект дают и неподвижные фосфаты при «зафосфачивании». В настоящее время использование «медленных» удобрений в мире крайне ограничено, в РФ они практически не используются. К сожалению, надо признать, что переход на «медленные» удобрения в мировом масштабе уже невозможен: последуют резкое снижение урожайности и немедленный глобальный голод. «Точку невозврата» в этом вопросе человечество уже прошло. Теперь, загнав себя в ловушку, человечество вынуждено бесполезно терять существенную часть и без того скудных запасов фосфора.

К сожалению, использование фосфоритной муки ограничено еще и по той причине, что фосфориты, как правило, содержат много U, Th, Cd, которые при производстве суперфосфатов уходят в фосфогипс [35]. Тем не менее, фосфоритная мука разрешена к использованию в таких странах, как ЕС, Австралия, Индия.

Органическое сельское хозяйство

Современные адепты «органического земледелия» как отказа от использования химических удобрений в пользу органических, прежде всего навоза, могли бы заявить: «нравится вам наш тип хозяйствования или нет, но после истощения запасов фосфатов вы все равно к нему придете». Они могли бы также сослаться на опыт средневекового хозяйствования в Европе и на Руси, устойчиво функционировавших столетиями и даже тысячелетиями. Давайте посмотрим, есть ли у органического земледелия будущее? Можно ли будет воспользоваться этим опытом после «великого

голода»? Данные идеи критиковались, и не раз [25]. Основные тезисы критики: низкая продуктивность. Переход на данную систему по всему миру прямо сейчас сократит производство продуктов в несколько раз и вызовет голод. Использованный навоз не добавляет новый фосфор в систему, а только возвращает взятый, к тому же возвращает не полностью. Добавим: отчуждение урожая, а значит существование городов при данном типе хозяйствования вообще не предусматривается. Далее: невозможно обойтись без сельскохозяйственных животных, следовательно, расширение пастбищ и, соответственно, сокращение пашни еще более усугубит ситуацию. А переход на вегетарианство (отказ от сельскохозяйственных животных) для всего населения не позволит свести баланс по фосфору [31].

От себя добавим: данная система не будет работать в большинстве стран и при наличии животных. Налицо непонимание того, как работала система, допустим, в X–XIX веках в ландшафтах среднерусской полосы.

Поскольку данная тема, насколько известно автору, нигде не освещена в литературе, выскажем свой взгляд на средневековое сельское хозяйство. Скот пасся в перелесках, на косогорах, в низинах, между оврагами – на неудобьях, которые не было смысла распахивать. Съеденный днем травостой ночью аккумулировался в стойлах в виде навоза. Скошенное на неудобьях сено зимой также превращалось в навоз, который складировался. По весне все это развозилось по полям. Человеческий кал тоже компостировался, но длительно, 3–4 года, и тоже вывозился на поля. Смысл в том, что *фосфор при этом переносился горизонтально*, с неудобий, которые по площади превосходили удобряемую пашню. Именно это и давало возможность и поддерживать нулевой баланс по фосфору, и вывозить урожай. Из этого очевидно, что в степных районах типа нашего Ставрополя, Краснодарского края, в казахских степях и на равнинах Аргентины, Австралии, где поля идут сплошняком, данная система не будет работать в принципе. Переносить фосфор просто неоткуда.

Возможности

Современная западная мысль уже осознала проблему [37, 42]. В ряде публикаций [31, 32, 34, 35] предложены меры, которые можно обобщить термином «замкнутый фосфорный цикл»: полное возвращение навоза, человеческого кала и мочи, в том числе использование «сухих туалетов», отдельный сбор кала и мочи, по возможности полное высаживание фосфора из городских канализаций, более сдержанное использование удобрений, уменьшение эрозии сельхозугодий. Однако сами же авторы пишут, что эти меры лишь частично уменьшат потери фосфора [36] и что подобные меры вряд ли будут приняты во всем мире,

кроме разве что Старой Европы и Сев. Америки, поскольку рециклинг фосфора по стоимости превосходит производство нового удобрения в три раза. Из других мер предлагается переход на вегетарианство [35], активное производство бобовых (их корневые экссудаты активнее извлекают фосфор из подпочвенных пород).

Отечественные публикации по данной теме практически отсутствуют, за исключением единичных, скорее публицистических, статей [25]. Ограниченность российской фосфатной базы известна [1, 17, 30], но тревожных заключений или предложений к изменению ситуации не делается. Провозглашенный экономический курс – наращивание производства на экспорт [2, 8] может продолжаться до полного исчерпания ресурса. Свои предложения мы дадим чуть ниже.

Теперь, когда глобальный голод и сокращение населения планеты в 3–4 раза уже можно считать неизбежным, попробуем представить себе мир «после голода». Мир «без удобрений» с «фоновой» урожайностью мы можем представить, взглянув на мир XIX – начала XX века с предельным населением в 2–2,5 млрд человек. Можно ли будет превысить этот предел? Какие формы примет сельское хозяйство после исчерпания месторождений фосфора, прежде всего фосфоритов? Такой вопрос равнозначен вопросу: какова предельная отчуждаемая урожайность (или, в случае животноводства, биомасса) на сельскохозяйственных почвах без внесения минеральных фосфатных удобрений, но при этом не сопровождающаяся их деградацией? Отчуждаемым урожаем мы называем ту часть урожая, которая перемещается с сельскохозяйственных земель прежде всего в города и не возвращается в почву коротким замкнутым циклом. В отчуждаемый урожай не входят, например, корма сельскохозяйственных животных, в основном возвращаемые в почву в виде навоза. Также не входит сюда и костный материал животных, при правильном хозяйствовании также возвращаемый в коротком цикле в виде костной подкормки животных.

Теоретически – да, такие формы хозяйствования возможны. При этом население Земли может даже значительно превышать заявленный предел в 2,5 млрд. Совсем обойтись без фосфатов не удастся, но некоторые промежуточные решения есть. Хозяйствование возможно, если *однократно или периодически вводить в сельскохозяйственный цикл дополнительный фосфор, после чего не давать ему выходить из цикла*. Для этого, конечно, должен иметься некий резервный запас фосфатов и должна быть строжайшая дисциплина в хозяйствовании. Например, при таком хозяйствовании будет запрещен сбор урожая выше определенного расчетного уровня, вплоть до закапывания обратно в землю всего сверхнормативного урожая.

Одно из возможных решений здесь – развитие гидропоники, при которой потери фосфора системой минимальны. Крупный минус в том, что так может выращиваться лишь очень ограниченное количество культур.

Политика крупных игроков

– КНР. Опасность осознана. Вынужденно – крупнейший (около 50% мировой добычи) производитель фосфатов. Маховик добычи до полного исчерпания ресурса уже не может остановиться. С 2022 года запрещен вывоз фосфатов за пределы страны. В течение 20 лет впадет в полную зависимость от внешних источников (вероятно, Марокко, Алжир, Россия). Уже сейчас широко производится рециклинг кала, мочи, золы шлама [31].

– Индия. Полная зависимость от внешних источников, своих ресурсов нет.

– США. Законсервированы крупные месторождения во Флориде (примерно половина запасов). Объявленная причина – высокие содержания Cd, U, Th. Настоящая причина, вероятно, в том, чтобы, не привлекая внимания, придержать свои запасы, пока есть возможность импортировать сравнительно недорого. Разрабатываются месторождения в Сев. Каролине. Примерно половина потребности покрывается импортом из Перу и Марокко.

– Марокко. При наличии 70% мировых запасов фабрики по производству концентрата загружены всего лишь на 70% [35]. Химическую промышленность по производству удобрений не развивает. Полностью ориентирована на торговлю с платежеспособными странами Европы, США, Азии. Бедные африканские страны почти не получают фосфатные удобрения.

– Россия. Полное непонимание ситуации. По сути – варварская трата ресурса на экспорт по невысокой цене, до его полного исчерпания.

Рекомендации

Какие меры следует предпринять, чтобы отсрочить фосфорную катастрофу? К сожалению, тут не обойтись чисто хозяйственными советами. Придется затронуть и политические вопросы.

– Прежде всего, надо осознать надвигающуюся опасность. Ситуация должна быть понята на государственном уровне в РФ и более глобально на уровне сообщества государств (пока правительство РФ проблему не осознает, ООН проблему также «не видит»).

– Политическая парадигма, в которой могущество государства считается пропорциональным его населению, должна быть отвергнута. Экономическая парадигма, что эффективность глобального производства пропорциональна рынку сбыта (= населению доступных рынков), также должна быть отвергнута. Все государства должны взять курс на снижение населения в несколь-

ко раз. Запасы фосфатов истощатся по разным оценкам через 80–200 лет. Если использовать это время для сокращения населения в 3–4 раза, то можно даже избежать массового голодного вымирания. Другой вопрос, что никто предпринимать никаких мер не собирается и, видимо, не соберется. Одна из возможных мер – увеличение доли городского населения. По демографическим законам скученность населения в городах существенно снижает рождаемость. Укрупнение городов при всех отрицательных сторонах имеет существенный плюс как сдерживающий рост населения фактор.

Из чисто технических мер можно предложить следующие:

– Гиперфорсированные методы хозяйствования (более 80 кгNKP/га) должны быть поставлены под запрет. Форсированные методы (20–80 кгNKP/га) должны применяться только при условии замыкания цикла фосфора.

– Насколько возможно, переход от использования «быстрых» легкорастворимых фосфатных удобрений типа фосфата аммония (аммофос), фосфата калия в пользу медленно растворимых удобрений типа «фосфоритная мука». Такой переход сильно ограничит смыв фосфатов в речную сеть и ограничит потери фосфора при производстве удобрений. При этом, разумеется, урожаи значительно снизятся.

– Перекрытие каналов ухода фосфора в речную сеть: высаживание фосфата в осадок хлоридом кальция или другими солями кальция на стадии очистки канализационных вод.

– Полное использование «илового осадка» как удобрения. А в случае сжигания – полная переработка золы на фосфатные удобрения.

– Отказ от производства биотоплива. Запрет высаживания рапса, поглощающего много фосфора. Ограничение (особенно в России) культур с высокой удельной биомассой (кукуруза, подсолнечник), быстро истощающих почвы по фосфору.

– Для Российской Федерации. Наша страна обладает 1,8% мировых запасов фосфатов. Это очень не много. При этом страна дает 4,4% мирового производства фосфорных удобрений, что означает исчерпание запасов ускоренными темпами. Мы добровольно, за бесценок распродаем тот запас, который помог бы нам пройти период «великого голода» без человеческих жертв. Необходим полный запрет на вывоз фосфатных удобрений за рубеж. Современное положение (данные за 2019 год), когда из 4,1 млн тонн произведенных фосфатных удобрений (на действующее вещество – P₂O₅) 3,1 млн тонн (76%) идет на экспорт, надо признать неприемлемо опасным для будущего страны.

– Фосфатные удобрения должны стоить дорого. Хотя бы для того, чтобы рециклинг фосфора из сточных вод стал рентабельным. Без этого рециклинг останется уделом отдельных экологически ориенти-

рованных государств. Сейчас разница в стоимости трехкратная. Любой экономист с горизонтом планирования не более чем 10–20 лет сочтет за аксиому, что лучше продать 2 тонны по 420\$/т, чем 1 тонну по 600\$. Современная экономика зиждется на стремлении увеличить выручку за счет увеличения производства. В результате страна теряет, если считать потери в 20–30% при производстве, 91% своих запасов фосфора не на своих жителей. Если же вспомнить, что Россия стала в последние десятилетия крупнейшим экспортером зерна, то цифру потерь нужно еще увеличить. При этом общая выручка от продажи фосфорных удобрений за рубеж (2,3 млрд \$ США в 2017 году) составила лишь 0,15% от ВВП России за тот же год. Причем очевидно, что всего лишь через несколько десятков лет (свои фосфаты закончатся к 2075 году) страна будет закупать эти же самые удобрения в Марокко по гораздо большей цене. Разумеется, при том условии, что возможность купить тогда еще будет. Не исключено, что к тому времени Марокко будет уже под полным контролем КНР или США.

– Строжайшая дисциплина в землепользовании под контролем государства. Аренда пахотной земли в РФ на короткие сроки (10–20 лет) приводит к тому, что арендаторы истощают землю, не внося компенсирующего количества удобрений. Производители сельхозпродукции должны отчитываться банковскими переводами, подтверждающими покупку удобрений в количествах, пропорциональных урожаю.

Итог

Как ни печально, человечество стоит перед жесточайшей дилеммой: смерть от голода сотен миллионов людей в самое ближайшее время или отложенная на конец века смерть 7–8 млрд человек. По-видимому, осознание близости «фосфорной катастрофы» достаточно скоро повлечет за собой ограничение торговли сельхозпродукцией между странами, войны за ресурсы. А пока страны-экспортеры сельхозпродукции и удобрений (к которым сейчас относится и Россия) рискуют быстро истратить свои фосфорные ресурсы.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Ангелов АИ, Алейнов ДП. Перспективы обеспеченности промышленности минеральных удобрений фосфатным сырьем. Химическая промышленность сегодня. 2006;(7):11-7.
2. Баталин ЮВ, Карпова МИ, Фахрутдинов РЗ. Сырьевая база агрохимического сырья России как основа повышения эффективности производства и потребления минеральных удобрений. В кн.: Неметаллические полезные ископаемые России: современное состояние сырьевой базы и актуальные проблемы научных исследований. М.: ИГЕМ РАН; 2004. С. 53-5.
3. Батурин ГН. К вопросу о соотношении между первичной продукцией органического углерода в океане и фосфатонакоплением (голоцен – поздняя юра). Литология и полезные ископаемые. 2004;(4):356-89.
4. Вильямс ВР. Травопольная система земледелия. Избранные труды. М.: Сельхозгиз; 1949.
5. Виноградов АП. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР; 1957.
6. Виноградов АП. Введение в геохимию океана. М.: Наука; 1967.
7. Гаррелс Р, Маккензи Ф. Эволюция осадочных пород. М.: Мир; 1974.
8. Георгиевский АФ, Бугина ВМ. Современное состояние и перспективы развития фосфатно-сырьевой базы России. Вестник РУДН. Сер. инженерные исследования. 2020;21(3):197-207. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207>.
9. Горощенко ЛГ. Российское производство минеральных удобрений в 2014 году и в 1 квартале 2015 года. Химический комплекс России. 2015;(6):22-7.
10. Григорьев АВ. Минерально-сырьевая база ОАО «Апатит». Перспективы развития. Горная промышленность. 2006;(6):5-8.
11. Григорьев НА. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры. Геохимия. 2003;(7):785-92.
12. Дегтярёв АП. Биофильность: новый взгляд на понятие. Доклад на конференции «Современное развитие биогеохимических идей В.И. Вернадского». М., 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=4768-KdTIQA>.
13. Жмур НС. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: Акварос; 2003.
14. Заварзин АГ. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука; 2003.

15. Заварзин АГ. Начальные этапы эволюции биосферы. Вестник РАН. 2012;(12):1085-98.
 16. Захарова ЕА. Основные закономерности глобального стока фосфора (1995). Автореф. дис. eLIBRARY ID: 30135952.
 17. Козловский ЕА. Россия: минерально-сырьевая политика и национальная безопасность. М., 2002.
 18. Манская СМ, Кодина ЛА. Геохимия лигнина. М.: Наука; 1975.
 19. Минеев ВГ. Агрохимия. М., 2017.
 20. Непряхин АЕ, Беляев ЕВ, Карпова МИ, Лужбина ИВ. Фосфоритовая составляющая МСБ России в свете новых технологических возможностей. Георесурсы, 2015;(4):67-74.
 21. Орлов ДС. Химия почв. М.: Из-во МГУ; 1992.
 22. Попов АИ. Гуминовые вещества. Свойства, строение, образование. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2004.
 23. Романкевич ЕА. Живое вещество Земли (биогеохимические аспекты проблемы). Геохимия. 1988;(2): 292-306.
 24. Савенко ВС. Обмен CO₂ между океаном и атмосферой в настоящее время и в прошлом. Геохимия. 2000;(3):350-2.
 25. Стекольников КЕ. Органическое земледелие в России – благо или катастрофа? Биосфера. 2020;12(1-2):53-62.
 26. Сытник КМ, Брайон АВ, Городецкий АВ. Биосфера. Экология. Охрана природы. Справ. пособие. Киев: Наукова думка; 1987.
 27. Труды совещания 20–22 мая 1915 г. с участием представителей науки, земских и общественных учреждений. Петроград; 1915. С. 422-5.
 28. Коплан-Дикс ИС. Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод. Л.: Наука; 1988.
 29. Холодов ВН. Геохимические проблемы поведения фосфора – основа биогенной гипотезы фосфоритообразования. Литология и полезные ископаемые, 2014;(3):235-57.
 30. Чуркин ОЕ, Ларичкин ФД, Гилярова АА. Фосфатные ресурсы Арктики: современное состояние и среднесрочные перспективы. Север и рынок: формирование экономического порядка. 2018;(6):73-9. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.6.2018.62.73-79.
 31. Zavarzin AG. [Initial stages of the evolution of the biosphere]. In: *Nemetallicheskiye Poleznyye Iskopaemye Rossii: Sovremennoye Sostoyanie Syryevoy Bazy i Aktualnyye Problemy Nauchnykh Issledovaniy*. Moscow: IGEM RAN; 2004. P. 53-5. (In Russ.)
 32. Baturin GN. [On relationships between the primary production of organic carbon in the ocean and phosphate accumulation (Holocene – Late Jurassic)]. *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 2004;(4):356-89. (In Russ.)
 33. Vilyams VR. *Travopolnaya Sistema Zemledeliya*. *Izbrannye Trudy*. Moscow: Selkhozgiz; 1949. (In Russ.)
 34. Vinogradov AP. *Geokhimiya Redkikh i Rasseyannykh Khimicheskikh Elementov v Pochvakh*. Moscow: Izdatelstvo AN SSSR; 1957. (In Russ.)
 35. Vinogradov AP. *Vvedeniye v Geokhimiyu Okeana*. Moscow: Nauka; 1967. (In Russ.)
 36. Garrels RM, Mackenzie FT. *Evolution of Sedimentary Rocks*. N-Y; 1971.
 37. Georgiyevskiy AF, Bugina VM. [The current state and prospects for the development of the phosphate raw material base of Russia]. *Vestnik RUDN Ser Inzhenernye Issledovaniya*. 2020;21(3):197-207. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207>. (In Russ.)
 38. Goroshchenko LG. [Russian production of mineral fertilizers in 2014 and in the 1st quarter of 2015]. *Khimicheskii Kompleks Rossii*. 2015;(6):22-7. (In Russ.)
 39. Grigoryev AV. [Mineral resource base of joint-stock company «Apatit». Development prospects]. *Gornaya promyshlennost*. 2006;(6):5-8. (In Russ.)
 40. Grigoryev NA. Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust. *Geochemistry International*, 2003;(7):785-92.
 41. Degtyaryev AP. [Biophilicity: a new look at the concept]. Presented at Conference «Sovremennoye Razvitiye Biogeokhimicheskikh Idey V.I. Vernadskogo». Moscow; 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=4768-KdTIQA>. (In Russ.)
 42. Zhmur NS. *Tekhnologicheskiye i Biokhimicheskkiye Protsessy Ochistki Stochnykh Vod na Sooruzheniyakh s Aerotenkami*. Moscow: Akvaros; 2003.
 43. Zavarzin GA. *Lekcii po prirovedcheskoy microbiologii*. M.: Nauka; 2003. 348 p. (In Russ.)
 44. Zavarzin GA. [The initial stages of the evolution of the biosphere]. *Vestnik RAN*. 2012;(12):1085-98. (In Russ.)
 45. Zakharova YeA. *Osnovnye Zakonomernosti Globalnogo Stoka Fosfora*. Cand Sci Theses; 1995. eLIBRARY ID: 3013595 (In Russ.)
- Общий список литературы/References**
1. Angelov AI, Aleynov DP. [Prospects for the provision of mineral fertilizers industry with phosphate raw materials]. *Khimicheskaya Promyshlennost Segodnia*. 2006;(7):11-7. (In Russ.)
 2. Batalin YuV, Karpova MI, Fakhrutdinov RZ. [The raw material base of the agrochemical stock of

17. Kozlovskiy YeA. Rossiya: Mineralno-Syryevaya Politika i Natsionalnaya Bezopasnost. Moscow; 2002. (In Russ.)
18. Manskaya SM, Kodina LA. Geokhimiya Lignina. Moscow: Nauka; 1975. (In Russ.)
19. Mineyev VG. Agrokhimiya. Moscow; 2017. (In Russ.)
20. Nepriakhin AYe, Beliayev YeV, Karpova MI, Luzhbina IV. [Phosphorite component of Russian raw materials base in the light of new technological opportunities]. *Georesursy*, 2015;(4):67-74. (In Russ.)
21. Orlov DS. Khimiya Pochv. Moscow: MGU; 1992. (In Russ.)
22. Popov AI. Guminovye Veshchestva. Svoystva, Stroyeniye, Obrazovaniye. Saint Petersburg: SPbGU; 2004. (In Russ.)
23. Romankevich YeA. Living matter of the Earth (the biogeochemical aspects of the problem). *Geochemistry International*. 1988;(2):292-306.
24. Savenko VS. CO₂ exchange between the ocean and the atmosphere now and in the past. *Geochemistry International*, 2000;(3):350-2.
25. Stekolnikov KYe. [Is organic farming in Russia a blessing or a disaster?]. *Biosfera*;2020;12(1-2):53-62. (In Russ.)
26. Sytnik KM, Brayon AV, Gorodetskiy AV. Biosfera. Ekologiya. Okhrana Prirody. Kiev: Naukova Dumka; 1987. (In Russ.)
27. Anonymous. Trudy Soveshchaniya 20-22 Maya 1915 g s Uchastiyem Predstaviteley Nauki, Zemskikh i Obshchestvennikh Uchrezhdeniy. Petrograd; 1915. P. 422-5. (In Russ.)
28. Koplan-Diks IS. Evolyutsiya Krugovorota Fosfora i Evtrofirovaniye Prirodnikh Vod. Leningrad: Nauka; 1998. (In Russ.)
29. Kholodov VN. [Geochemical problems of phosphorus behavior – the basis of the biogenic hypothesis of phosphorite formation]. *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*, 2014;(3):235-57. (In Russ.)
30. Churkin OYe, Larichkin FD, Gilyarova AA. [Phosphate resources of the Arctic: current state and medium-term prospects]. *Sever i Rynok Formirovaniye Ekonomicheskogo Poriadka*. 2018;(6):73-9. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.6.2018.62.73-79. (In Russ.)
31. Alewell Ch, Ringeval B, Ballabio C, Robinson DA, Panagos P, Borrelli P. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nat Comm*. 2020:4546.
32. Bouwman AF, Beusen AHW, Billen G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970-2050. *Glob Biogeochem Cycles*. 2009;23:1-16. <https://doi.org/10.1029/2009gb003576>.
33. Bowen HJM. Environmental Chemistry of the Elements. N.-Y.: Acad. Press; 1979.
34. Carpenter SR, Bennett EM. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. *Environ Res Lett*. 2011;6:1-12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/014009>.
35. Cordell D, Drangert JO, White S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Glob Environ Change*. 2009;19:292-305. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
36. Edixhoven JD, Gupta J, Savenije HHG. Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: a critique. *Earth Syst Dynam*, 2014(5):491-507.
37. Gilbert N. Environment: the disappearing nutrient. *Nature*. 2009;461:716-8.
38. McDowell RW, Noble A, Pletnyakov P, Haygarth PM. A global database of soil plant available phosphorus. *Sci Data* 2023;10:125. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02022-4>.
39. Notholt AJG, Sheldon RP, Davidson DF, Eds. Phosphate Deposits of the World. Vol. 2. Phosphate Rock Resources. Cambridge Univ. Press; 2014.
40. Tiessen H. Introduction and synthesis. In: Phosphorus in the Global Environment. Chichester: J. Wiley, 1995. P. 1–6.
41. U. S. Geological Survey, 2018. Mineral Commodity Summaries 2018. URL: <https://doi.org/10.3133/70194932>.
42. Use of Phosphorus. Consultative Communication on the Sustainable. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels: European Commission; 2013.
43. Van Kauwenbergh SJ. Global Phosphate Rock Reserves and Resources, the Future of Phosphate Fertilizer. Agricultural Outlook Forum 2014 168423, United States Department of Agriculture, Agricultural Outlook. DOI: 10.22004/ag.econ.168423, and Resource Initiative IFDC. US Department of Agriculture; 2014.