

УДК 502/504:550.7:631.6

С. А. МАКСИМОВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»**УПРАВЛЕНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИМИ БАРЬЕРАМИ  
ПРИ МЕЛИОРАЦИИ ЗЕМЕЛЬ**

*Отмечено, что человек в известных пределах может регулировать тепло- и влагообеспеченность территорий путем мелиорации, тем самым улучшая самоочищаемость геосистем. Доказано, что моделирование процессов переноса и трансформации веществ в биогеохимических барьерах, возникновения или создания новых барьеров, совместной работы барьеров различной природы позволяет разрабатывать сценарии управления биогеохимическими барьерами, устанавливать значения параметров инженерно-экологических систем, оценивать и прогнозировать результаты управления биогеохимическими барьерами при мелиорации земель.*

*Мелиорация, самоочищаемость геосистем, моделирование, перенос и трансформация вещества, биогеохимические барьеры, управление, инженерно-экологические системы.*

*It is noted that man within certain limits can regulate heat – and water supply of areas by means of reclamation thus improving self-clearance of geo-systems. It is proved that modeling the processes of transference and transformation of substances in bio-geo-chemical barriers, appearance and creation of new barriers, mutual work of barriers of different nature makes it possible to develop scenarios of bio-geo-chemical barriers control, specify parameters values of engineering – ecological systems assess and forecast results of bio-geo-chemical barriers control at land irrigation.*

*Reclamation, self-clearance of geo-systems, modeling, transference and transformation of substance, bio-geo-chemical barriers, control, engineering – ecological systems.*

Сегодня в России мелиорация претерпевает серьезные изменения, обусловленные не только природными процессами, но и процессами, тесно связанными с тем, что происходит в обществе, науке, технологиях. Доставшиеся в наследство от Советского Союза части мелиорации (мелиоративная наука, мелиоративное производство, мелиоративная инфраструктура, мелиоративный менеджмент) либо тихо умирают, либо трансформируются, подчиняясь реальности.

Традиционно под мелиорацией (от лат. *melioratio* — улучшение) понимают совокупность организационно-хозяйственных и технических мероприятий, направленных на коренное улучшение земель [1]. Мелиорация дает возможность: а) изменять комплекс природных условий (почвенных, гидрологических и др.) обширных регионов в нужном для хозяйственной деятельности человека направлении; б) создавать благоприятные для

полезной флоры и фауны водный, воздушный, тепловой и пищевой режимы почвы и режимы влажности, температуры и движения воздуха в приземном слое атмосферы; в) оздоравливать местность и улучшать природную среду. Основное отличие мелиорации от других мероприятий, связанных с улучшением земель и повышением плодородия почв, — длительность ее действия и те коренные изменения в природе, к которым она приводит.

В современной всемирной электронной энциклопедии приводится несколько иное определение: мелиорация — это комплекс организационно-хозяйственных и технических мероприятий по улучшению гидрологических, почвенных и агроклиматических условий с целью повышения эффективности использования земельных и водных ресурсов для получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. Определения как будто бы

исчерпывающие, но, скорее, привычные. Дело в том, что такое коренное позитивное изменение природы, к которому приводит мелиорация, нельзя рассматривать лишь в рамках природопользования.

С одной стороны (технологической), мелиорация — это действительно совокупность мероприятий. С другой стороны, мелиоративные мероприятия обосновываются и дозируются в результате исследований, глубокого изучения процессов, протекающих в природе. С точки зрения синергетики (науки о самоорганизации сложных систем) мелиорация является полиморфной, синтетической наукой.

Объект мелиорации, масштабность мелиоративного воздействия на природу, ее цели, те коренные изменения, к которым она приводит, позволяют выделять мелиорацию земель как часть особой деятельности человека по отношению к природе — природообустройству. Объектом мелиорации являются земли различного назначения. В результате мелиорации земли приобретают новое качество, т.е. новую ценностную характеристику функционального единства существенных свойств, новую внутреннюю и внешнюю определенность, относительную устойчивость [2].

Вместе с тем, мелиорируемые земли являются частью геосистемы. Под геосистемами понимают парагенетические ассоциации ландшафтных структур различной крупности, состоящих из взаимосвязанных компонентов, взаимообусловленных в своем размещении и развивающихся как единое целое [3]. Геосистемы обладают рядом фундаментальных свойств: целостностью, сложностью, разнообразием, структурностью, функционированием, открытостью, устойчивостью, динамичностью, способностью развиваться, продуцированием биомассы, способностью образовывать почвы, нелинейностью и пр. В то же время геосистемы являются совокупностью элементов, постоянно трансформирующихся во времени и пространстве, связанных между собой потоками веществ (механических, физико-химических, биогенных, техногенных), потоками энергии и информации.

Под биогеохимическими барьера-

ми понимают естественные или искусственные объекты, в которых вследствие замедления одних процессов и/или ускорения других происходит накопление энергии, вещества, информации. Такие объекты распространены повсеместно, а процессы в них протекают непрерывно. Биогеохимические барьеры могут быть вертикальными или горизонтальными (латеральными), препятствующими вертикальным или горизонтальным потокам соответственно. По тому, какие именно процессы влияют на потоки, барьеры называют сорбционными, испарительными, гидравлическими, щелочными или кислотными и т.п.

Человек, управляя природными процессами, протекающими в биогеохимических барьерах, усиливая или ослабляя их действие, создает условия для целенаправленного изменения, улучшения свойств компонентов природы.

Мелиорация существенно изменяет многие природные процессы, например: мелиорация сельскохозяйственных земель трансформирует процесс почвообразования — в результате ее применения исчезают одни элементы почвообразования и появляются другие, в частности оглеение, засоление, торфообразование. Мелиорация способна превратить азональные почвы (пойменные, болотные, засоленные) в зональные, а также существенно модифицировать зональное почвообразование.

Природные биогеохимические барьеры обеспечивают самоочищаемость природы. В них происходит не только накопление, но и трансформация токсичных веществ в формы безопасные или недоступные для биоты.

Антропогенные потоки веществ часто превосходят возможности природы к самоочищению, поэтому управление биогеохимическими барьерами и улучшение свойств компонентов природы имеет огромное экологическое значение, а мелиоративные технологии становятся важнейшим инструментом экологии.

При мелиорации земель, по сути, часто регулируют действия биогеохимических барьеров: глубокое рыхление плотных подпочвенных горизонтов, увеличение

естественной дренированности, изменение скорости впитывания воды, противифльтрационные барьеры, разрушение гипсовых или оглеенных горизонтов и т.п. Борьба с загрязнением земель также заключается в управлении барьерами, создании одних и разрушении других.

Несмотря на то что механизмы синтеза, накопления, связывания и разрушения веществ очень разнообразны, их объединяет общая закономерность — интенсивность этих процессов во многом зависит от обеспеченности территории теплом и влагой. При оптимальном сочетании тепла и влаги биогеохимические барьеры работают эффективней. Человек в известных пределах может регулировать тепло- и влагообеспеченность территорий путем мелиорации, тем самым улучшая самоочищаемость геосистем. При мелиорации сельскохозяйственных земель основными биогеохимическими барьерами являются растения, почвенная биота и почвы, а также подстилающие материнские грунты зоны аэрации и грунты зоны полного насыщения. Барьерами на пути потоков веществ являются также мелиоративные системы, дренажи, гидротехнические сооружения, дамбы обвалования и т.п.

Растения утилизируют ряд веществ в процессе метаболизма (обмена веществ). Например, хорошо развитый и интенсивно продуцирующий биомассу травянистый покров ежегодно потребляет: углерода (в форме  $\text{CO}_2$ ) — 250...300, азота — 300...500, фосфора (в форме  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) — 60...120, калия (в форме  $\text{K}_2\text{O}$ ) — 300...600 кг/га.

Мощным биогеохимическим барьером является почва — активно функционирующее органоминеральное тело, в котором идут разнообразные физико-химические, биологические и микробиологические процессы. Почва способна задерживать или поглощать газы, растворенные вещества, минеральные или органические частицы и суспензии. Поглощательная способность обусловлена наличием высокодисперсной, коллоидной части почвы, имеющей большую удельную поверхность.

Поглотительную способность почвы

можно регулировать доступными агротехническими и мелиоративными приемами, повышая тем самым барьерную функцию почвы, например: внесением в почву органических удобрений; изменением химических свойств; уменьшением степени засоления; регулированием количества влаги в почве; внесением сорбентов естественного или искусственного происхождения; обогащением микрофлоры почвы специальными бактериями (биодеструкторами).

Почва выполняет свои барьерные функции вместе с подстилающими грунтами и грунтовыми водами, при этом возникает так называемый гидрофизический барьер, который характеризуется направлением и величиной потоков влаги в зоне аэрации и в полностью водонасыщенных горных породах. Например, уменьшая промываемость почвы и верхних горизонтов грунтов, можно в определенной степени защитить жизненно важные водоносные горизонты или, наоборот, усилить промываемость почвы для ее очистки. Очень эффективно совместное использование барьеров разной природы.

Для обеспечения своих барьерных функций барьеры должны обладать определенными свойствами и находиться в определенных состояниях, регламентированных обоснованным режимом их существования. Для почв барьерный режим может быть отождествлен с мелиоративным режимом, который, в свою очередь, выражается в виде набора определенных показателей. При мелиорации сельскохозяйственных земель мелиоративный режим может характеризоваться следующими показателями в самом общем виде:

допустимые пределы регулирования влажности корнеобитаемого слоя;  
допустимые пределы глубин грунтовых вод;

критические сроки отвода поверхностных вод;

допустимые направление и величина влагообмена между корнеобитаемым слоем почвы и подстилающими слоями или грунтовыми водами;

кислотность почвенного раствора, состав и количество поглощенных оснований;  
требуемая динамика запасов гумуса

и питательных веществ в почве;

допустимое содержание токсичных солей в почве и почвенном растворе;

предельное значение общей минерализации поливной воды, соотношение в ней ионов натрия и кальция, рН;

допустимое количество и качество дренажных вод, сбрасываемых в поверхностные водотоки или водоемы.

При мелиорации городских земель, земель транспорта, земель лесного фонда главная цель может меняться, могут меняться способы достижения цели, могут меняться показатели режима функционирования барьера, но сущность мелиорации остается постоянной — управлять потоками веществ энергии и информации в геосистемах.

Итак, мелиорация — это коренное изменение свойств компонентов природы, повышение их полезности для человека и сохранение его жизненного пространства. Сущность мелиорации заключается в управлении потоками веществ энергии и информации в биогеохимических барьерах.

Управление потоками в биогеохимических барьерах, поддержание их барьерных функций осуществляется с помощью инженерных (мелиоративных, экологических) систем, отдельных сооружений при проведении специальных, часто долгосрочных, мероприятий.

Современная мелиоративная наука широко использует знания о процессах переноса, протекающих в природе. Для изучения биогеохимических барьеров, для обоснования режимов их работы, для оптимального расчета параметров инженерных систем с целью управления потоками веществ применяют наиболее совершенные методы научного познания — методы математического моделирования.

При моделировании многокомпонентных потоков веществ и энергии в почвах и грунтах используют уравнения термодинамики необратимых процессов (1), (6)...(14). Причиной возникновения необратимых потоков является неоднородность свойств компонентов окружающей среды в пространстве, а также температуры и химического

(парциального) потенциала. Такой подход позволяет строго формально рассматривать довольно сложные перекрестные природные процессы и отражает идею их единства [4].

Для описания влагопереноса в зоне полного и неполного насыщения используют уравнение тепломассопереноса:

$$C \frac{dH}{dt} = \frac{d}{dx} \left( K_w \frac{dH}{dx} \right) - \bar{e}_k, \quad (1)$$

где  $t$  — время, сут;  $H$  — полный напор почвенной влаги, учитывающий гравитационную и каркасно-капиллярную составляющие при отсчете напоров от поверхности земли по оси  $x$ , направленной вниз, м;

$$H = -x + \varphi, \quad (2)$$

где  $x$  — гравитационный потенциал, м;  $\varphi$  — каркасно-капиллярный потенциал — напор, эквивалентный каркасно-капиллярному давлению в зоне неполного насыщения и гидростатическому давлению в зоне полного насыщения, м;  $C$  — коэффициент влагоемкости (Голованов, 1975);  $m_B^3/m^4$ ,  $m_B^3$  — кубический метр почвенной влаги или подземных вод;

$$C = \frac{d\omega}{dH} = -\frac{d\omega}{d\varphi}, \quad (3)$$

где  $\omega$  — объемная влажность почвы,  $m_B^3/m^3$ .

При изменении влажности от полного насыщения до влажности, соответствующей максимальной гигроскопичности (МГ), между влажностью  $\omega$  и капиллярным потенциалом  $\varphi$  принимается следующая зависимость:

$$\omega = \omega_M + (m - \omega_M) \exp \left( -\eta \left| \frac{\varphi}{h_k} \right|^\mu \right), \quad (4)$$

где  $\eta$ ,  $\mu$  — эмпирические коэффициенты;  $\omega_M$  — влажность почвы, соответствующая максимальной гигроскопичности,  $m_B^3/m^3$ ;  $m$  — пористость,  $m_B^3/m^3$ .

Коэффициент влагопроводности  $K_W$ ,  $m_B^3/m^2/сут$ , по А. И. Голованову:

$$K_W = K_f \left( \frac{\omega - \omega_M}{m - \omega_M} \right)^5, \quad (5)$$

где  $K_f$  — коэффициент фильтрации (влагопроводность при полном насыщении),  $m_B^3/m^2/сут$ ;  $e_k$  — интенсивность отбора почвенной влаги корнями растений из единичного объема почвы,  $m_B^3/m^3/сут$ .

Коэффициент фильтрации зависит от особенностей развития корневой системы, влажности почвы и энергетических возможностей приземного слоя атмосферы:

для аммония  $NH_4$  —

$$\frac{\partial(\omega C_a)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \omega D_k \frac{\partial C_a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \omega D_k \frac{\partial C_a}{\partial y} \right) - \frac{\partial(q_x C_a)}{\partial x} - \frac{\partial(q_y C_a)}{\partial y} + \frac{\partial G_a}{\partial t} - \frac{\partial S_a}{\partial t} - K_H \omega C_a - Q_a; \quad (6)$$

для нитратов  $\text{NO}_3^-$  —

$$\frac{\partial(\omega C_n)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \omega D_k \frac{\partial C_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \omega D_k \frac{\partial C_n}{\partial y} \right) - \frac{\partial(q_x C_n)}{\partial x} - \frac{\partial(q_y C_n)}{\partial y} + K_n \omega C_a - K_d \omega C_n - Q_n, \quad (7)$$

где  $C_a, C_n$  — концентрация соответственно аммония и нитратов в почвенном растворе, кг·экв/м<sup>3</sup>;  $q_x, q_y$  — соответственно вертикальный и горизонтальный потоки влаги, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>/сут;  $S_a$  — количество сорбированного аммония, кг·экв/м<sup>3</sup>;  $\partial S_a / \partial t$  — интенсивность сорбции или десорбции аммония почвенным поглощающим комплексом, кг·экв/м<sup>3</sup>/сут;  $\partial G_a / \partial t$  — поступление в раствор аммония в результате аммонификации (разложения) гумуса, кг·экв/м<sup>3</sup>/сут;  $K_n$  и  $K_d$  — коэффициенты скорости нитрификации и денитрификации, сут<sup>-1</sup>;  $Q_a$  и  $Q_n$  — интенсивность отбора соответственно аммонийного и нитратного азота корнями растений из единичного объема почвы, кг·экв/м<sup>3</sup>/сут.

Для описания процессов переноса и трансформации веществ, движения воздушных масс в атмосфере используются следующие уравнения:

согласно второму закону механики —

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \sum F_x; \quad \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \sum F_y; \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \sum F_z; \quad (8)$$

уравнение сохранения массы воздуха —

$$\frac{\partial(1/\rho)}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right); \quad (9)$$

уравнение сохранения массы водяного пара —

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{D_m}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right); \quad (10)$$

уравнение сохранения количества энергии —

$$\frac{\partial \theta_n}{\partial t} = \left[ a \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial r}{\partial z} \right] \frac{\theta_n}{\theta}; \quad (11)$$

уравнение состояния —

$$p = \rho R \theta, \quad (12)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  — компоненты скорости по осям  $x, y$  и  $z$ ;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность воздуха;  $F_x, F_y, F_z$  — проекции силы на прямоугольные оси координат, которые выражаются через переменные, уже входящие в приведенную систему;  $\omega$  — удельная влажность воздуха;  $D_m$  — коэффициент молекулярной диффузии водяного пара;  $\theta$  — потенциальная температура;  $\theta_n = \theta(1000/p)^{0,29}$ ;  $\theta$  — температура воздуха;  $a$  — коэффициент молекулярной теплопроводности воздуха;  $r$  — поток радиации;  $c_p$  — удельная теплоемкость воздуха;  $p$  — его давление;  $R$  — газовая постоянная.

Процессы антропогенного загрязнения нефтепродуктами и накопление углеводородов в почвах, грунтах и грунтовых водах (по А. И. Голованову):

$$p \frac{\rho_n}{\rho_b} C_{вн} \frac{\partial H_n}{\partial t} - p(C_{вн} - C_b) \frac{\partial H_b}{\partial t} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_n f_n \frac{\partial H_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_n f_n \frac{\partial H_n}{\partial y} \right);$$

$$p C_{вн} \frac{\partial H_b}{\partial t} - p \frac{\rho_n}{\rho_b} C_{вн} \frac{\partial H_n}{\partial t} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_b f_b \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_b f_b \frac{\partial H_b}{\partial y} \right), \quad (14)$$

где  $p$  — пористость;  $\rho$  — плотность;  $C_b$  и  $C_{вн}$  — емкостные коэффициенты, связывающие насыщенности и напоры.

При  $0 < s_b + s_n < 1$   $C_b = \frac{\partial(s_b + s_n)}{\partial \psi_b}$ ;  
 при  $s_b + s_n = 1$  и при  $s_b + s_n = 0$   $C_b = 0$ ;  
 при  $s_b^* < s_b < (1 - s_n^*)$   $C_b = -\frac{\partial s_{вн}}{\partial \psi_{вн}}$ ;  
 при  $s_b = s_b^*$  и при  $s_b = 1 - s_n^*$   $C_{вн} = 0$ ,  
 где  $s_b$  и  $s_n$  — насыщенность водой и нефтепродуктом, т.е. отношение объема жидкости к объему пор;  $s_b^*$  и  $s_n^*$  — насыщенность гидравлически неподвижной водой и нефтепродуктом;  $\psi_b$  — гидростатическая, или капиллярная составляющая напора воды.

### Выводы

Моделирование довольно сложных процессов переноса и трансформации веществ в биогеохимических барьерах, процессов возникновения или создания новых барьеров, совместной работы барьеров различной природы позволяет разрабатывать сценарии управления биогеохимическими барьерами, устанавливать значения параметров инженерно-экологических систем, а также адекватно оценивать или прогнозировать результаты управления биогеохимическими барьерами при мелиорации земель.

1. Большая советская энциклопедия: в 30 т. — М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1969—1978. — Т. 27. — С. 100—102.

2. **Перельман А. И.** Геохимия ландшафта: учебное пособие для географических и геологических специальностей университетов. — 2-е изд. — М.: Высшая школа, 1975. — 341 с.

3. Природообустройство: учебник для вузов / А. И. Голованов [и др.]. — М.: КолосС, 2008. — 552 с.

4. **Голованов А. И., Пестов Л. Ф., Максимов С. А.** Геохимия техноприродных ландшафтов. — М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2006. — 201 с.

Материал поступил в редакцию 01.04.10.

**Максимов Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мелиорация и рекультивация земель»

Тел. 8-963-762-36-22

E-mail: s.a.maksimov@mail.ru