

УДК 549.057:552.14+532.546

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГЛИН

*Р.П. Федорин, М.Г. Храмченков*

### Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с загрязнением грунтов и почв, содержащих глинистые минералы. Особое внимание уделено оценке изменения содержания связанной воды в составе грунта в зависимости от степени загрязнения, а также изменению теплофизических характеристик грунта, влияющих на энергомассообмен с атмосферой.

**Ключевые слова:** глины, грунт, загрязнение, связанная вода, теплофизические свойства, атмосфера.

---

### Введение

Особая роль, которую играют глинистые минералы в составе грунтов и почв, связана с высокой дисперсностью глинистых минералов. Основная часть глинистых минералов в составе грунтов и почв находится в так называемой илистой фракции (размер частиц меньше 1 мкм). В большинстве типов грунтов и почв в составе илистой фракции преобладают глинистые минералы, относящиеся к подклассу слоистых силикатов (в кристаллической решетке таких минералов обязательно присутствует как структурный элемент слой кремнекислородных тетраэдров). Среди наиболее часто встречающихся типов глинистых минералов в грунтах и почвах можно отметить каолиниты, слюды и гидрослюды (иллиты), хлориты, вермикулиты, монтмориллониты (сметтиты) и смешанослойные образования. Помимо тонкодисперсных слоистых силикатов в состав илистой фракции грунтов и почв входят также минералы, имеющие ленточное или промежуточное строение (сепиолит – палыгорскит), каркасные силикаты (полевые шпаты), кварц, аморфные алюмосиликаты, оксиды и гидроксиды железа и алюминия, карбонаты, а также некоторые другие минералы. Благодаря высокой дисперсности, глинистые минералы обладают огромными величинами удельной поверхности [1].

Химическая активность высокодисперсных глинистых минералов объясняется рядом факторов. Прежде всего это адсорбция катионов на поверхности глинистых минералов, которая обусловлена главным образом отрицательным зарядом кристаллической решетки, и адсорбция молекул воды, которая связана с наличием на поверхности глинистых минералов ионов кислорода и гидроксильных групп). Кроме того, это наличие в их кристаллической решетке ионов с переменной валентностью, прежде всего железа (в разных геохимических обстановках глинистые минералы могут быть окислителями или восстановителями из-за изменившейся соответствующим образом степени окисления железа).

Вокруг находящихся на поверхности глинистых минералов ионов формируется сильное электростатическое поле, что способствует проявлению каталитических свойств глинистых минералов в природных средах. К наиболее типичным для глинистых минералов в природных условиях относятся реакции сорбции-десорбции, фиксации и обмена катионов и других частиц, гидратации-дегидратации и др. От количества и состава глинистых минералов зависят теплофизические, водно-физические и физико-механические свойства грунтов и почв в целом. Загрязнение грунтов и почв, то есть попадание в среду, как правило, химически активных веществ, сказывается на всем комплексе свойств, связанных с присутствием глинистых минералов в составе грунтов и почв.

### 1. Особенности связывания воды в глинах

Как было установлено в [2], при описании набухания глин необходимо отразить специфику их взаимодействия с водой и ионами. Эта специфика заключается в следующем. И молекулы воды, и ионы раствора, находящегося в порах глины, могут проникать в микропоры глины и покидать их, однако не все. Систему не могут покинуть ионы, обеспечивающие электрическую нейтральность всей системы в целом. Таким образом, если при осмосе [3] через полупроницаемую мембрану способен проходить один компонент раствора и не способен другой, то в данном случае имеет место явление, когда лишь часть одного из компонентов системы не способна покидать систему. В условиях, сформированных давлением вышележащих горных пород, смена гидрохимического равновесия вызывает силы, способствующие раздвижению глинистых частиц, чему препятствуют как структурные ограничения, так и собственно вес горных пород. Единственным механизмом, позволяющим частицам хоть как-то уменьшить избыточную энергию Гиббса, является механизм раздвижения глинистых частиц, названный в [2] веерным. Напомним его суть. В условиях ограниченного объема пор процесс набухания сводится к заполнению глинистыми частицами свободного пространства пор или к обратному процессу в случае поступления более концентрированного раствора. Однако добиться полного разрушения микроагрегатов до единичных силикатных слоев (своеобразных «элементарных частиц») бывает трудно даже в лабораторном опыте, не говоря уже об условиях, присущих реальной гидрохимической обстановке. Скорее всего, для реальных условий характерна частичная перестройка структуры кристаллитов (микроагрегатов), с которой связан процесс формирования микропор, как это и было выявлено в ходе соответствующих экспериментов. В результате ионного обмена на части базальных поверхностей внутренних силикатных слоев в кристаллите появляются катионы натрия с зарядом +1 вместо образующих катионные мостики ионов кальция с зарядом +2. Поскольку это происходит в условиях существенно ограниченного объема, то катион меняется на катион, а второму катиону натрия, необходимому для обеспечения электронейтральности системы в целом, трудно локализоваться в месте, первоначально занятом катионом кальция.

Таким образом, положительный компенсирующий заряд ионно-гидратного слоя [2] при ионном обмене перераспределяется, что вызывает появление сдвиговых усилий электростатической природы. Это приводит к развороту и смачиванию той части поверхности силикатных слоев, на которых завершился

процесс ионного обмена, и таким образом формируется «веерная» структура частиц. Формируется вторая осмотическая система глины (первая образована катионами в результате диссоциации на базальных поверхностях кристаллитов). Развита в [2] и [4] модель реализации веерного механизма набухания глин привела к хорошему совпадению теоретических результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Количество воды, оставшейся «зажатой» между глинистыми частицами, можно отнести к прочносвязанной воде в глинах. Это количество можно оценить. Обозначим через  $x$  долю удельной поверхности глинистых частиц, на которой располагается прочносвязанная вода, а через  $d_0$  – толщину пленки прочносвязанной воды. Тогда, очевидно, можно записать

$$A_c(1-x)H + A_cxd_0 = V_c. \quad (1)$$

Здесь  $A_c$  – удельная поверхность частиц глины,  $V_c$  – объем глины в составе единичного объема породы,  $H$  – размер микропор. Тогда для объема связанной воды в глине  $y$  получим

$$y = A_c d_0 \left[ 1 - \frac{(V_c / A_c) - d_0}{H - d_0} \right]. \quad (2)$$

Очевидно, что всегда выполняется условие  $d_0 \leq (V_c / A_c)$  из-за наличия микропор и  $H \geq d_0$  в силу определения размера микропор. Если воспользоваться зависимостью расстояния  $H$  от концентрации порового раствора  $C$  вида  $H = 1/\sqrt{C}$ , характерной, как показано в [2], для сравнительно небольших значений концентрации порового раствора, то (2) перейдет в

$$y = A_c d_0 \left[ 1 - \frac{(V_c / A_c) - d_0}{1 - d_0 \sqrt{C}} \sqrt{C} \right]. \quad (3)$$

Отметим, что последняя формула справедлива для таких значений концентрации порового раствора, пока знаменатель дроби в квадратных скобках формулы (3) заметно больше нуля. Удерживая члены первого порядка малости в (3), получим следующее приближенное соотношение

$$y = A_c d_0 \left[ 1 - [(V_c / A_c) - d_0] \sqrt{C} \right]. \quad (4)$$

Полученные соотношения говорят об уменьшении количества связанной глиной воды с ростом концентрации порового раствора в соответствии с (3). Это вполне согласуется с выявленной в ходе экспериментов [2] тенденцией, связанной с ростом микропористости и одновременным увеличением концентрации порового раствора. Рост микропористости сопровождается уменьшением поверхности перекрытия глинистых частиц и, таким образом, уменьшением количества воды на этой поверхности.

## 2. Некоторые теплофизические характеристики глин

Как было отмечено выше, при увеличении концентрации порового раствора доля связанной воды в грунте (почве) уменьшается. Исходя из этого, можно

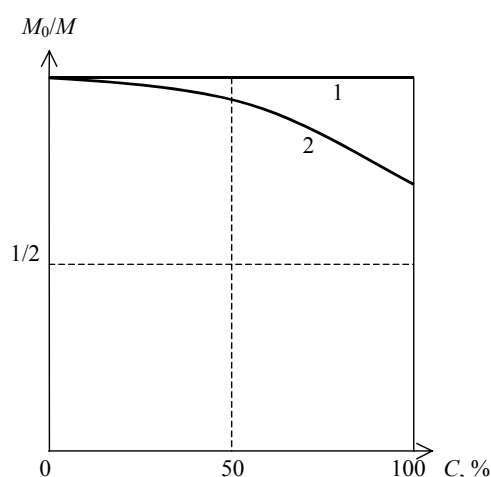


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоусвоения от концентрации: 1 – незагрязненная почва, 2 – загрязненная почва

оценить зависимость теплоемкости грунта или почвы от концентрации порового раствора. Используем для этого формулу Андрианова [5]:

$$C_w = 0.2p + 0.7q + (w - q). \quad (5)$$

Здесь  $C_w$  – удельная теплоемкость влажного грунта во внесистемных единицах (кал/грамм градус); 0.2 – удельная теплоемкость твердой фазы грунта;  $p$  – весовое количество минеральных частиц; 0.7 – удельная теплоемкость связанной воды;  $q$  – весовое количество прочносвязанной воды;  $w$  – влажность. Очевидно, что  $q = \rho_w y = y$  для удельной теплоемкости воды, принятой за 1.

Для того чтобы проследить влияние загрязнения почвы или грунта, ведущее к увеличению концентрации порового раствора, оценим характеристики энергомассообмена загрязненного грунта или почвы с атмосферой. Для этого воспользуемся соотношением из [5] для коэффициента теплоусвоения  $M$  и параметра  $\psi$ , отвечающих за особенности теплообмена поверхности грунта или почвы с атмосферой:

$$M = \sqrt{\pi / \tau} (4\sigma T_0^3)^{-1} \sqrt{\lambda \rho_s C_w}, \quad (6)$$

$$\psi = \arctg[M / (1 + M)], \quad (7)$$

где  $\tau$  – период температурных колебаний,  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $T_0$  – средняя температура,  $\lambda$  – теплопроводность грунта,  $\rho_s$  – плотность грунта. Параметр  $\psi$  характеризует запаздывание температуры поверхности почвы или грунта по сравнению с температурой атмосферы.

Подставляя в (6) и (7) выражение для теплоемкости грунта или почвы из (5), можно видеть, что с ростом концентрации порового раствора параметр  $\psi$  растет. Это говорит о том, что по сравнению со случаем, когда концентрация порового раствора меньше, мы наблюдаем достижение поверхностью температуры атмосферы за больший промежуток времени. Таким образом, нагрев грунта или почвы будет не поспевать за ходом температурной кривой атмосферы,

и грунт или почва будут более «холодными» на данное время суток, что неблагоприятно скажется на ряде свойств грунта и агрофизических характеристик почвы. Вид полученной кривой для зависимости параметра  $M$  от концентрации раствора приведен на рис. 1.

Другим важным фактором влияния концентрации порового раствора на энергомассообмен грунта или почвы с атмосферой является динамика переноса водяного пара в грунте или почве до дневной поверхности деятельного слоя. Дело в том, что фильтрующийся поток пара будет протекать по части межагрегатных пор, не занятых влагой в микрокапиллярах.

### Summary

*R.P. Fedorin, M.G. Khramchenkov. Geo-Environmental Aspects of Clay Contamination.*

The article deals with the problems regarding the contamination of clay soils. Special attention is paid to the estimation of changes in the immobile soil water content depending on the level of contamination. The influence of thermal and physical characteristics of soil on the energy and mass exchange between soil and atmosphere is analyzed.

**Key words:** clays, soil, contamination, immobile water, thermal and physical properties, atmosphere.

### Литература

1. *Кульчицкий Л.И., Усъяров О.Г.* Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1981. – 178 с.
2. *Храмченков М.Г., Эйриш М.В., Корнильцев Ю.А.* Изучение структурных изменений и термодинамическая модель фильтрационных свойств глинистых пород // Геоэкология. – 1996. – № 5. – С. 65–73.
3. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы. – М.: Наука, 1987. – 398 с.
4. *Федорин Р.П., Храмченков М.Г.* Набухание глин и фильтрация растворов в глинах // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер- Естеств. науки. – 2010. – Т. 152, кн. 1. – С. 235–243.
5. *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 647 с.

Поступила в редакцию  
09.06.10

---

**Федорин Роман Петрович** – младший научный сотрудник НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского (Приволжского) федерального университета.

**Храмченков Максим Георгиевич** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора НИИ математики и механики им. Н.Г. Чеботарева Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Maxim.Khramchenkov@ksu.ru](mailto:Maxim.Khramchenkov@ksu.ru)