

# НОВЫЕ ИДЕИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ



Труды Международной научной конференции  
(Москва, МГУ, 4 февраля 2021 г.)

Москва – 2021 г.



Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Российская академия естественных наук  
Московское общество испытателей природы

# НОВЫЕ ИДЕИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

Труды Международной научной конференции  
(Москва, МГУ, 4 февраля 2021 г.)

*Под редакцией В.Т. Трофимова и В.А. Королёва*



Москва – 2021 г.

---

УДК 624.131  
ББК 26.3р3(2Рос)я22

**НОВЫЕ ИДЕИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ** / Труды Международной научной конференции (Москва, МГУ, 4 февраля 2021 г.) // Под редакцией В.Т. Трофимова и В.А. Королёва – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. - 334 с., ил.

В сборнике представлены материалы и доклады участников Международной научной конференции, состоявшейся на геологическом факультете МГУ им М.В.Ломоносова 4 февраля 2021 г. На конференции обсуждались современные проблемы инженерной геологии по пяти секциям: 1) Новые идеи и гипотезы в инженерной геологии. 2) Теоретические построения в инженерной геологии. 3) Новые идеи, теория и практика изучения динамических свойств грунтов. 4) Цифровизация и искусственный интеллект в инженерной геологии. 5) Новые идеи и результаты изучения инженерно-геологических объектов.

Для специалистов в области инженерной геологии, истории и методологии науки, а также студентов и аспирантов вузов.

**NEW IDEAS AND THEORETICAL ASPECTS OF ENGINEERING GEOLOGY** / Proceedings of the International Scientific Conference (Moscow, Moscow State University, February 4, 2021) // Edited by V.T. Trofimov and V.A. Korolev - M.: LLC «Sam Polygraphist», 2021. - 334 p., Ill.

The miscellany contains materials and reports of the participants of the International Scientific Conference held at the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University on February 4, 2021. The conference discussed modern problems of engineering geology in five sections: 1) New ideas and hypotheses in engineering geology. 2) Theoretical constructions in engineering geology. 3) New ideas, theory and practice of studying the dynamic properties of soils. 4) Digitalization and artificial intelligence in engineering geology. 5) New ideas and results of studying geotechnical objects.

For specialists in the field of engineering geology, history and methodology of science, as well as students and graduate students of universities.

ISBN 978-5-00166-244-0

© Геологический факультет МГУ, 2021

97-108.

3. Геология лёсса и лессовидных пород в СССР. – М., 1989, 170 с.
4. Зеркаль О.В., Габдуллин Р.Р., Самарин Е.Н. Современные проблемы четвертичной геологии центральной части Крымского полуострова. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. №3. С. 27-34
5. Карта распространения и просадочности лёссовых пород СССР/под ред. Е.М.Сергеева. Масштаб 1:2500000. М., 1989
6. Лёссовый покров Земли и его свойства/В.Т.Трофимов, С.Д.Балыкова, Н.С.Болиховская и др. М.: Изд-во МГУ, 2001. 464с.
7. Cohen K.M., Gibbard P.L. Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, version 2019 Q1-500. Quaternary International. 2019. v. 500. pp. 20-31
8. Haase D., Fink J., Haase G., Ruske R., Pécsi M., Richter H., Altermann M., Jäger K.-D. Loess in Europe - its spatial distribution based on a European Loess Map, scale 1:2,500,000. Quaternary Science Reviews. 2007. v. 26 (9-10). pp. 1301-1312.

#### LOESS OF SOUTHERN COAST OF CRIMEA. THE FIRST DATA

O.V.Zerkal, E.N.Samarin, I.P.Gvozdeva

*Lomonosov Moscow State University*

**Abstract.** The data obtained for the first time on the distribution of loess on the southern slope of the Crimean Mountains are presented. Within the South Coast of the Crimea, two types of loess strata are described. It is shown that loess of the South Coast of the Crimea range from slightly to extremely subsiding.

**Keywords:** loess, southern slope of the Crimean mountains, subsidence

УДК 624.131

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА И ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГРУНТАХ

В.А. Королев<sup>1</sup>, Д.С. Нестеров

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, <sup>1</sup>va-korolev@bk.ru*

**Аннотация.** Рассмотрено применение термодинамики необратимых процессов для оценки параметров сопряженных процессов массопереноса (влагоперенос, миграция катионов и анионов) и электрокинетических явлений в дисперсных грунтах на основе анализа закономерностей переноса, представленных в виде переопределенной системы уравнений.

**Ключевые слова:** дисперсные грунты, явления переноса, термодинамика необратимых процессов, электрокинетические явления

При воздействии на водонасыщенный глинистый грунт поля постоянного электрического тока в нём, помимо явления

электроосмоса, возникают различные сопряженные процессы переноса, влияющие друг на друга. Их взаимодействие зависит от минерального состава грунта, его структурных особенностей, состава и концентрации электролита порового раствора, особенностей обменного комплекса грунта, а также и от внешних факторов – параметров воздействующего электрического поля, его режима и т.п. [2]. Наиболее полно взаимное влияние этих процессов можно оценить на основе теории термодинамики необратимых процессов [3,4].

В простейшем случае, когда анализируются только электроосмос и напорная фильтрация, взаимодействие этих процессов переноса описывается известными соотношениями Саксена [2]. Наша задача – рассмотреть не только взаимодействие этих двух процессов, но и *учесть влияние других сопряженных процессов, обусловленных наличием в поровом растворе и обменном комплексе грунта тех или иных ионов.* Обычно эти сопряженные процессы не анализируются, однако их вклад в общий массоперенос может быть существенным, как и взаимное влияние этих процессов.

Исходя из этого, рассмотрим термодинамику совместных процессов массопереноса, возникающих при наложении поля постоянного тока на водонасыщенный образец глинистого грунта, в обменном комплексе которого содержатся катионы  $\text{Na}^+$ , а в поровом растворе, соответственно, хлорид натрия известной начальной концентрации ( $C_0$ ), диссоциирующий на катионы  $\text{Na}^+$  и анионы  $\text{Cl}^-$ . Вместо  $\text{NaCl}$  может рассматриваться любая другая соль или комплекс солей. Кроме того, будем учитывать в поровом растворе диссоциацию воды на  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Будем рассматривать открытую и закрытую системы, конструкция которых либо позволяет электроосмотическому потоку воды выходить из образца, либо нет, соответственно.

Приложение поля постоянного электрического тока к такому образцу вызовет формирование нескольких сопряженных потоков ( $I_i$ ) массопереноса:

- 1) потока воды  $I_w$  от анода к катоду под действием электроосмоса;
- 2) потока электричества  $I_\phi$  под действием разности электрических потенциалов  $\Delta\phi$ ;
- 3) потока анионов хлора  $I_{\text{Cl}}$  от катода к аноду;
- 4) потока анионов гидроксила  $I_{\text{OH}}$  также от катода к аноду;
- 5) потока катионов натрия  $I_{\text{Na}}$  от анода к катоду;
- 6) потока катионов водорода  $I_{\text{H}}$  также от анода к катоду.

Тогда в общем случае массоперенос рассматриваемых компонентов в грунте может быть описан системой линейных уравнений Онзагера:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_w = \sum_i L_{wi} X_i \\ I_\varphi = \sum_i L_{\varphi i} X_i \\ I_{Cl} = \sum_i L_{Cl i} X_i \\ I_{OH} = \sum_i L_{OH i} X_i \\ I_{Na} = \sum_i L_{Na i} X_i \\ I_H = \sum_i L_{H i} X_i \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $L_{ij} = L_{ji}$  – феноменологические коэффициенты переноса или коэффициенты пропорциональности;  $X_i$  – обобщенные силы, вызывающие перенос, представленные теми или иными градиентами потенциалов переноса, т.е.  $X_i = \nabla P_i$ , или  $\nabla P_i = \text{grad } P_i = \Delta P_i / \Delta x$ , где  $x$  – координата вдоль направления переноса  $i$ -й субстанции.

Учитывая, что для потока воды ( $I_w$ ) обобщенной силой переноса является градиент потенциала влаги ( $X_w = \nabla P_w$ ), для потока электричества ( $I_\varphi$ ) обобщенной силой переноса является градиент электрического потенциала ( $X_\varphi = \nabla \varphi$ ), для потока анионов хлора ( $I_{Cl}$ ) обобщенной силой переноса является градиент химического потенциала хлора ( $X_{Cl} = \nabla \mu_{Cl}$ ), для потока ионов гидроксидов ( $I_{OH}$ ) обобщенной силой переноса является градиент химического потенциала гидроксил-ионов ( $X_{OH} = \nabla \mu_{OH}$ ), для потока натрия ( $I_{Na}$ ) обобщенной силой переноса является градиент химического потенциала натрия ( $X_{Na} = \nabla \mu_{Na}$ ), и, наконец, для потока ионов водорода ( $I_H$ ) обобщенной силой переноса является градиент химического потенциала ионов водорода ( $X_H = \nabla \mu_H$ ), раскроем полностью эту систему уравнений:

$$\begin{aligned} I_w &= L_{ww} X_w + L_{w\varphi} X_\varphi + L_{wCl} X_{Cl} + L_{wOH} X_{OH} + L_{wNa} X_{Na} + L_{wH} X_H \\ I_\varphi &= L_{\varphi w} X_w + L_{\varphi\varphi} X_\varphi + L_{\varphi Cl} X_{Cl} + L_{\varphi OH} X_{OH} + L_{\varphi Na} X_{Na} + L_{\varphi H} X_H \\ I_{Cl} &= L_{Clw} X_w + L_{Cl\varphi} X_\varphi + L_{Cl,Cl} X_{Cl} + L_{Cl,OH} X_{OH} + L_{Cl,Na} X_{Na} + L_{Cl,H} X_H \\ I_{OH} &= L_{OHw} X_w + L_{OH\varphi} X_\varphi + L_{OH,Cl} X_{Cl} + L_{OH,OH} X_{OH} + L_{OH,Na} X_{Na} + L_{OH,H} X_H \quad (2) \\ I_{Na} &= L_{Naw} X_w + L_{Na\varphi} X_\varphi + L_{Na,Cl} X_{Cl} + L_{Na,OH} X_{OH} + L_{Na,Na} X_{Na} + L_{Na,H} X_H \\ I_H &= L_{Hw} X_w + L_{H\varphi} X_\varphi + L_{H,Cl} X_{Cl} + L_{H,OH} X_{OH} + L_{H,Na} X_{Na} + L_{H,H} X_H. \end{aligned}$$

Поток воды ( $I_w$ ) определяется вкладом фильтрационного потока ( $I_\phi$ ), электроосмотического потока ( $I_{\phi 0}$ ), а также осмотическими потоками ( $I_{\phi Cl}$ ,  $I_{\phi OH}$ ,  $I_{\phi Na}$ ,  $I_{\phi H}$ ), вызванными градиентами концентраций соответствующих ионов  $Cl^-$ ,  $OH^-$ ,  $Na^+$  и  $H^+$ .

При это имеет место соотношения взаимности Онзагера:

$$\begin{aligned} L_{\phi w} &= L_{w\phi}; \quad L_{Clw} = L_{wCl}; \quad L_{OHw} = L_{wOH}; \quad L_{Naw} = L_{wNa}; \quad L_{Hw} = L_{wH}; \\ L_{Cl\phi} &= L_{\phi Cl}; \quad L_{Cl,OH} = L_{OH,Cl}; \quad L_{Cl,Na} = L_{Na,Cl}; \quad L_{Na\phi} = L_{\phi Na}; \quad L_{\phi OH} = L_{OH\phi}; \\ L_{H,OH} &= L_{OH,H}; \quad L_{OH,Na} = L_{Na,OH}; \quad L_{Na,H} = L_{H,Na}; \quad L_{H,Cl} = L_{Cl,H}; \quad L_{\phi H} = L_{H\phi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, для решения вышеприведенной системы уравнений, содержащей 36 феноменологических коэффициентов, необходимо знать шесть прямых (или собственных) коэффициентов  $L_{ww}$ ,  $L_{\phi\phi}$ ,  $L_{Cl,Cl}$ ,  $L_{OH,OH}$ ,  $L_{Na,Na}$ ,  $L_{H,H}$  и пятнадцать перекрестных, учитывая соотношение взаимности Онзагера. Здесь среди прямых коэффициентов  $L_{ww}$  имеет смысл коэффициента фильтрации (или влагопроводности для неполностью водонасыщенного грунта),  $L_{\phi\phi}$  – удельной электропроводности;  $L_{Cl,Cl}$  – коэффициента диффузии за счет ионов хлора;  $L_{OH,OH}$  – коэффициента диффузии за счет ионов гидроксила;  $L_{Na,Na}$  – коэффициента диффузии за счет ионов натрия;  $L_{H,H}$  – коэффициента диффузии за счет ионов водорода.

Если коэффициенты фильтрации (или влагопроводности) и электроосмоса в грунтах могут быть достаточно просто определены прямыми стандартными методами, то в отношении прочих коэффициентов переноса так сказать нельзя. Но, применяя термодинамику необратимых процессов, этот вопрос становится вполне решаемым. Рассмотрим один из подходов.

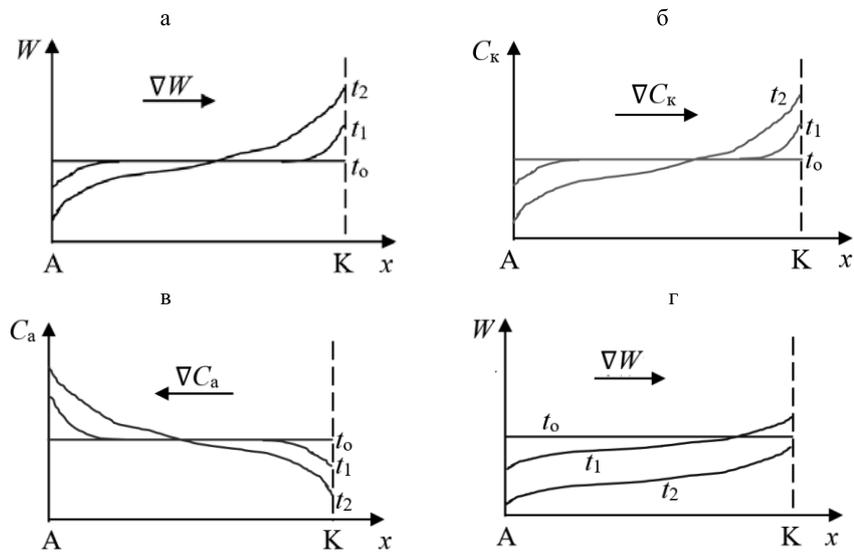
Поскольку рассматриваемая система уравнений образована линейными уравнениями, она может быть представлена или переписана в матричной форме:

$$I_i = |L_{ji}| \begin{pmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_i \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $|L_{ji}|$  – матрица феноменологических коэффициентов:

$$|L_{ji}| = \begin{vmatrix} L_{11} & \dots & L_{1i} \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{j1} & \dots & L_{ji} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

В рассматриваемом случае в результате процессов переноса происходит перераспределение вдоль образца (вдоль направления переноса – координаты  $x$ ) всех анализируемых шести субстанций: воды, потока электронов, потоков анионов и потоков катионов. В разные моменты времени от начала процесса ( $t_0=0$ ) вдоль координаты  $x$  будут формироваться профили содержания (концентрации) той или иной субстанции (воды  $W$ , катионов  $C_k$  и анионов  $C_a$ ), как показано на рис.



**Рис.** Перераспределение субстанций вдоль координаты  $x$  при электроосмосе на моменты времени  $t_0, t_1$  и  $t_2$ :  $a, \varepsilon$  – воды;  $\bar{b}$  – катионов;  $\bar{в}$  – анионов; А – анод; К – катод;  $a, \bar{b}, \bar{в}$  – закрытая система;  $\varepsilon$  – открытая система

Проанализируем поток воды  $I_w$ , возникающий в образце в ходе электроосмоса в закрытой системе (рис. 1,  $a$ ). Величина потока воды ( $I_w$ ) через среднее сечение образца ( $\bar{x} = x/2$ ) в единицу времени за интервал  $\Delta t = t_2 - t_1$  характеризует объемную скорость влагопереноса и находится из соотношения:

$$I_w = \frac{(\int_0^x W dx)_{t_2} - (\int_0^x W dx)_{t_1}}{t_2 - t_1}. \quad (6)$$

В открытой системе (с возможностью оттока воды из образца, рис. 1,  $\varepsilon$ ) характер профилей меняется, но оценка потоков может также

проводиться по уравнению (6). Раскроем входящие в величину  $I_w$  параметры согласно вышеприведенному уравнению:

$$I_w = L_{ww} X_w + L_{w\phi} X_\phi + L_{wCl} X_{Cl} + L_{wOH} X_{OH} + L_{wNa} X_{Na} + L_{wH} X_H. \quad (7)$$

В итоге получим:

$$I_w = -K_w \nabla P_w + K_{\phi_0} \nabla \phi - K_{Cl} \nabla \mu_{Cl} - K_{OH} \nabla \mu_{OH} + K_{Na} \nabla \mu_{Na} + K_H \nabla \mu_H, \quad (8)$$

где  $K_w$  – коэффициент фильтрации (или влагопроводности для неполностью водонасыщенного образца);  $K_{\phi_0}$  – коэффициент электроосмоса;  $K_{Cl}$  – коэффициент осмоса за счет ионов хлора;  $K_{OH}$ ,  $K_{Na}$ ,  $K_H$  – то же за счет ионов гидроксидов, натрия и водорода, соответственно. Таким образом, суммарный поток воды через среднее сечение образца грунта складывается из фильтрационного потока ( $I_\phi$ ), электроосмотического потока ( $I_{\phi_0}$ ), осмотического потока за счет градиента осмотического давления, обусловленного градиентом концентрации ионов хлора ( $I_{oCl}$ ), а также осмотических потоков за счет градиентов осмотического давления, обусловленного градиентами концентраций ионов гидроксидов ( $I_{oOH}$ ), натрия ( $I_{oNa}$ ) и водорода ( $I_{oH}$ ), соответственно.

$$I_w = -I_\phi + I_{\phi_0} - I_{oCl} - I_{oOH} + I_{oNa} + I_{oH}. \quad (9)$$

Причем, фильтрационный и электроосмотический потоки разнонаправлены, также как и осмотические потоки, вызванные анионами и катионами, что, соответственно, отражается знаками (–) или (+) в вышеприведенных уравнениях (8) и (9).

В состоянии равновесия поток воды прекращается ( $I_w=0$ ), т.к. уравновешивается противоположными градиентами. В этом случае имеет место равенство:

$$I_\phi + I_{oCl} + I_{oOH} = I_{\phi_0} + I_{oNa} + I_{oH}. \quad (10)$$

Учитывая, что степень гидратации ионов хлора, а также ионов водорода и гидроксид-ионов весьма мала, можно принять, что основной вклад в величину потока воды ( $I_w$ ) вносят фильтрационная и электроосмотическая составляющие, а также осмотический поток за счет ионов натрия. Тогда уравнение (10) можно упростить в виде:

$$I_\phi = I_{\phi_0} + I_{oNa}. \quad (11)$$



профиль  $C_H = f(x)$  есть не что иное как профиль изменения значений рН по длине образца ( $\text{pH} = f(x)$ ), который легко находится экспериментально. Зеркальным к нему будет профиль  $C_{OH} = f(x)$ , поскольку  $\text{pOH} = 14 - \text{pH}$ .

Аналогично системе уравнений (13) могут быть составлены и системы уравнений для других совместных потоков субстанций: электричества ( $I_\phi$ ), ионов хлора ( $I_{Cl}$ ), гидроксил-ионов ( $I_{OH}$ ), а также потоков ионов натрия ( $I_{Na}$ ) и водорода ( $I_H$ ). Нахождение соответствующих коэффициентов массопереноса для этих потоков проводится также путем решения соответствующих переопределенных систем уравнений.

Таким образом, методика анализа сопряженных процессов переноса состоит в выявлении (и вычислении) соответствующих коэффициентов переноса, являющихся для данного грунта (при неизменном химико-минеральном составе, а также плотности-влажности) константами. Для этого готовится образец грунта при требуемой плотности-влажности (или используется монолит). Затем часть этого образца помещается в электрокинетическую ячейку [2] для электроосмотических испытаний и подвергается воздействию тока. Через интервал времени  $t_1$  первый опыт прекращается, ячейка разбирается и по длине образца берутся пробы на влажность, рН и содержание анализируемых ионов. После этого опыт повторяется с другой пробой того же исходного образца в течение времени  $t_2 > t_1$  или при иной величине тока. Затем на том же образце грунта проводится аналогично третий, четвертый и др. опыты. Число таких опытов должно быть больше числа определяемых коэффициентов, чтобы получить переопределенную систему уравнений, как описано выше, решая которую в итоге находят искомые коэффициенты переноса.

#### Список литературы:

1. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. – М., Наука, 1989. – 240 с.
2. Королёв В. А. Теория электроповерхностных явлений в грунтах и их применение. — М., ООО «Сам полиграфист», 2015. — 468 с.
3. Королёв В. А. Термодинамика грунтов / Учебник. — М., ООО «Сам полиграфист», 2016. — 258 с.
4. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. / Изд. 2-е перераб. и доп. – М., Энергия, 1978.- 480 с.

#### METHODOLOGY FOR DETERMINING PARAMETERS OF COUPLED MASS TRANSFER PROCESSES AND ELECTROKINETIC PHENOMENA IN SOILS

V.A. Korolev<sup>1</sup>, D.S. Nesterov

Moscow State University named M.V. Lomonosov, <sup>1</sup>[va-korolev@bk.ru](mailto:va-korolev@bk.ru)

**Annotation.** The application of the thermodynamics of irreversible processes is considered for evaluating the parameters of coupled mass transfer processes (moisture transfer, migration of cations and anions) and electrokinetic phenomena in dispersed soils based on the analysis of transport patterns presented in the form of an overdetermined system of equations.

**Keywords:** dispersed soils, transport phenomena, thermodynamics of irreversible processes, electrokinetic phenomena

УДК 624.131

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЙОНАХ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

Ю.В.Фролова

*Геологический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, ju\_frolova@mail.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены условия формирования и инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона. Установлено, что породы, образованные в ходе единого гидротермально-метасоматического процесса, характеризующегося закономерной сменой условий во времени и пространстве, очень разнообразны по своим инженерно-геологическим особенностям, вплоть до принадлежности к грунтам различных классов. Показано, что масштабные преобразования пород, происходящие в пределах гидротермальных систем, являются одним из важнейших факторов формирования инженерно-геологических условий территорий геотермальных районов.

**Ключевые слова:** гидротермально-метасоматические породы, физико-механические свойства, вторичные минералы, инженерно-геологические условия

**Введение.** Важнейшей фундаментальной задачей грунтоведения является разработка учения о формировании свойств грунтов различных классов и генетических типов. В этом плане грунты гидротермально-метасоматического генезиса представляют собой весьма специфический и мало изученный объект грунтоведения. В области их исследования достаточно детально освещены геохимические и минералогические аспекты [1,2], в то время, как инженерно-геологическая сторона вопроса, включая динамику изменения физико-механических свойств пород в ходе гидротермально-метасоматических процессов, весьма далека от разрешения. Актуальность изучения грунтов гидротермально-метасоматического генезиса в настоящее время возрастает в связи с активным освоением геотермальных районов. В первую очередь, это связано с развитием альтернативной энергетики, в частности - с эксплуатацией геотермальных месторождений. Помимо этого, геотермальные районы славятся горячими источниками, гейзерами и другими термопроявлениями, что способствует развитию туризма.