

УДК 553.078.2 + 624.131

## СТРОЕНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ГЛИН ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ: ОТ МАКРО- ДО НАНОУРОВНЯ

*М.С. Чернов<sup>1</sup>, В.Н. Соколов<sup>1</sup>, С.Н. Рычагов<sup>2</sup>, Р.А. Кузнецов<sup>1</sup>, А.Р. Алёшин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет,  
Москва, 119992;

*e-mail: chernov@geol.msu.ru*

<sup>2</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский,  
683006; *e-mail: rychn@kscnet.ru*

В работе рассматривается макро-, микро- и наностроение гидротермальных глин, развитых на геотермальных полях Паужетско-Камбально-Кошелёвского геотермального (рудного) района юга Камчатки. Гидротермальные глины образуют высокопористые ультрадисперсные минеральные микро- и наносистемы, что может объяснить высокую физико-химическую активность таких новообразований.

### Введение

Гидротермальные глины являются одним из наименее изученных типов глинистых грунтов. Тем не менее, на Камчатке, Курильских островах и во многих других областях современного и четвертичного вулканизма (Апеннинский п-ов, США, Индонезия, Филиппины и др.) они образуют достаточно мощные и протяженные толщи и попадают в область инженерно-хозяйственной деятельности человека. Кроме того, и что особенно важно на наш взгляд, эти гидротермально-метасоматические новообразования несут в себе богатейшую информацию о природе взаимодействия гидротермальных систем с глубинным металлоносным флюидом [5].

Как известно, главными факторами, определяющими свойства горных пород и грунтов, являются их состав и строение. Для тонкодисперсных образований, таких как глинистые грунты – это микро- и наностроение. Как показали проведенные нами исследования, именно особенности состава, а также микро- и наностроения гидротермальных глинистых грунтов определяют их уникальные свойства, главным из которых является их высокая физико-химическая активность. Под гидротермальными глинистыми грунтами понимается первый от дневной поверхности горизонт наиболее интенсивной аргиллизации пород, формирующийся в результате гидротермальной переработки вулканитов и развитый в пределах термальных полей – участков естественной приповерхностной разгрузки гидротермальных растворов или парагазовой смеси.

Работа является результатом обобщения многолетних исследований состава, строения и свойств гидротермальных глинистых грунтов, отобранных из шурфов на 15 ключевых

участках термальных полей Паужетской гидротермальной системы и Нижне-Кошелевского пародоминирующего геотермального месторождения (Южная Камчатка).

### **Методы исследования**

Полевые методы включали проходку шурфов и скважин колонкового бурения, послойное опробование гидротермальных глин на определение их состава, строения и свойств. В естественном залегании определялись также показатели влажности и плотности грунтов.

Минеральный состав определялся методом рентгеновской дифрактометрии на приборе Rigaku ULTIMA-IV (аналитик: к.г.-м.н. В.В. Крупская, Геологический факультет МГУ). Микро- и наностроение грунтов изучалось с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1450VP, оснащенного микронзондовым анализатором INCA 300 (операторы проф. В.Н. Соколов, ст.н.с. М.С. Чернов).

Изучение свойств образцов гидротермальных глинистых грунтов выполнялось по стандартным методикам [3], расчетные и классификационные характеристики образцов получены в соответствии с ГОСТ 25100-2011 [1].

### **Макростроение гидротермальных глин**

Толща гидротермальных глин образует на термальных полях сплошной покров средней мощностью 1,5 - 2,5 м (на отдельных участках – до 5 м) и характеризует область разгрузки минерализованных и часто газонасыщенных растворов, формирующихся под влиянием восстановленных глубинных флюидов. В толще гидротермальных глин сверху вниз практически всегда выделяются два горизонта: серно- и углекислотного выщелачивания, характеризующихся различным строением и минеральным составом [5].

Глинистые грунты в зоне сернокислотного выщелачивания имеют пеструю охристо-красную окраску и брекчиевидную текстуру. В минеральном составе преобладает каолинит. Грунты характеризуются блочным строением, между блоками присутствует налет ожелезнения, либо тонкие корочки минералов кремнезема. Блоки разламываются с образованием раковинистого излома. В выделенном горизонте присутствует большое количество псевдоморфоз по обломкам исходных пород.

Зона углекислотного выщелачивания сложена глинами зеленовато- и синевато-серого цветов. Она занимает большую часть толщи. В минеральном составе преобладают глинистые минералы группы смектита и смешанослойный минерал каолинит-смектит. В ней также присутствуют псевдоморфозы по обломкам материнских пород. Характерной особенностью выделенной зоны является наличие участков пропаривания. К ним приурочены скопления и сплошные корочки микрокристаллов пирита, марказита и минералов кремнезема. Такие структуры обладают повышенной хрупкостью.

Между верхней и нижней зонами часто выделяется горизонт «синих глин» (интенсивно пиритизированных с содержанием других сульфидов) мощностью  $\geq 20$ -30 см. Он образуется на геохимических (термодинамических) барьерах и имеет особое строение: преобладание

минералов группы смектита (преимущественно монтмориллонита) в ассоциации с мелкими (0.5-1.0 мкм) кристаллами пирита, содержание которого достигает 10 % и более.

В гранулометрическом составе гидротермальных глинистых грунтов преобладают глинистая и пылеватая фракции (70-90 %), причем содержание глинистой фракции иногда достигает 90 %. Однако, в естественном сложении глинистая фракция таких грунтов полностью агрегирована, что связано с повышенной кислотностью среды. С увеличением глубины залегания грунтов содержание песчаной и пылеватой фракций увеличивается.

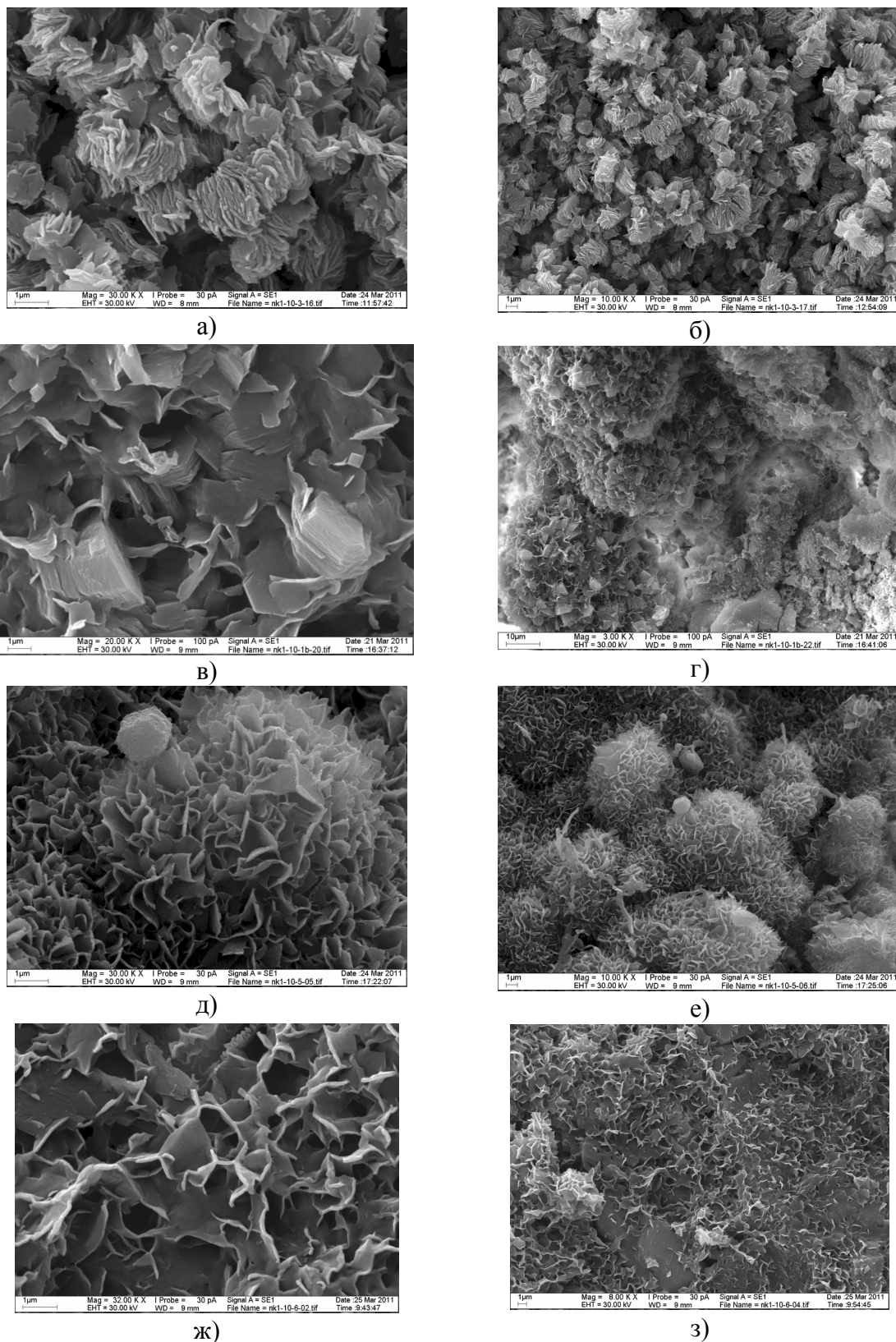
### **Микро- и наностроение гидротермальных глин**

Микроморфологические исследования горизонтов гидротермальных глин показали, что в верхней зоне преобладает доменоподобная микроструктура, сложенная пластинчатыми глинистыми частицами каолинита псевдогексагональной формы, собранными в доменоподобные пачки; края таких частиц имеют неровную «рваную» форму (рис. 1 а, б). На отдельных участках верхней зоны, где содержание смешанослойных образований типа каолинит-смектит становится больше, характерной является ячеисто-доменная микроструктура глин (рис. 1 в, г). Такая микроструктура сложена листообразными глинистыми наночастицами смешанослойных образований, контактирующих между собой по типу базис-скол и скол-скол, и формирующих при этом ячеистую сетку, в которую погружены микроагрегаты гексагональных частиц каолинита, собранных в пачки (домены).

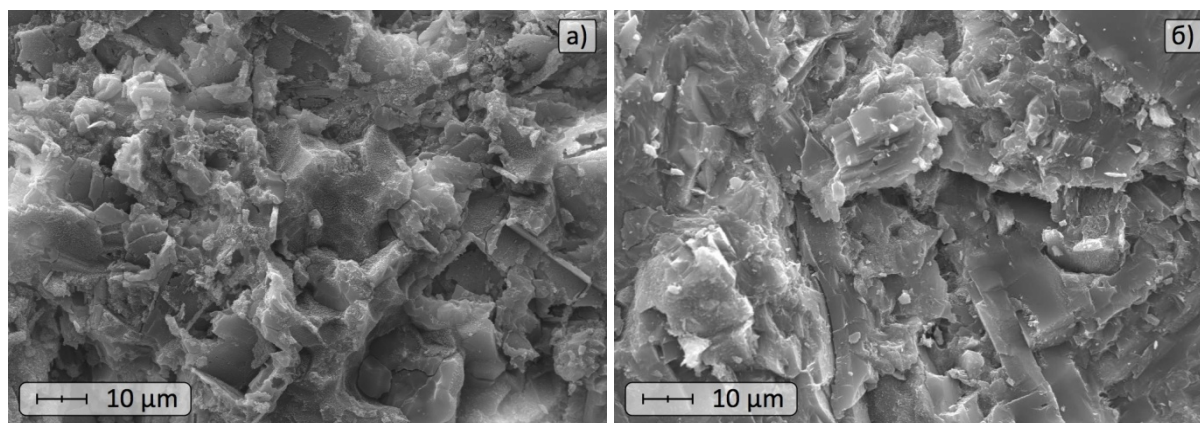
Нижняя зона разрезов гидротермальных глин характеризуется псевдоглобулярной и губчатой микроструктурой. Псевдоглобулярная микроструктура сложена микроагрегатами глинистых наночастиц железистого смектита, контактирующих между собой по типу базис-скол под острым углом (рис. 1 д, е). Микроагрегаты имеют округлую форму, напоминающую глобули, размером 2-10 мкм. Губчатая микроструктура сложена глинистыми частицами листоватой формы размером до 2-3 мкм, монтмориллонитового состава (рис. 1 ж, з). Частицы контактируют по типу базис-скол и образуют сплошную мелкочаеистую структурную сетку. К основанию разреза гидротермальных глин их микроструктура переходит к матричному типу: матрицы состоят из хаотично расположенных глинистых частиц и их микроагрегатов смектитового состава, в которую погружены песчаные и пылеватые зерна первичных пород. В подошве толщи гидротермальных глин микроструктура образцов становится неотличимой от микроструктуры материнской породы, например андезита (рис. 2).

Для горизонта «синих глин» характерна неоднородная микро- и наноструктура, поверхности отдельных глинистых частиц и микроагрегатов в которых являются зонами роста многочисленных мелких кристаллов пирита.

Стоит отметить, что большинство образцов гидротермальных глинистых грунтов характеризуются неоднородным строением. Так, в образцах из нижней части разреза на отдельных участках присутствует псевдогубчатая микроструктура, на других – доменоподобная или ячеистая. Такой характер изменения типа микроструктур объясняется неоднородностью состава и строения первичных пород, а также широким развитием в глинах смешанослойных минералов.



**Рис. 1.** Микро- и наноструктуры гидротермальных глин Нижне-Кошелёвской термоаномалии: а, б – доменоподобная (а – при увеличении 30000 раз, б – при увеличении 10000 раз); в, г – ячеисто-доменная (в – 20000 раз, г – 3000 раз); д, е – псевдоглобулярная (д – 30000 раз, е – 10000 раз); ж, з – губчатая (ж – 32000 раз, з – 8000 раз)



**Рис. 2.** Фрагменты микроструктуры образцов гидротермальной глины (а) и андезита (б)

Специальные исследования ультрадисперсного состава показали, что во всех гидротермальных глинистых грунтах присутствуют минеральные наночастицы (фракции  $< 0,1$  мкм), содержание которых в верхней части разрезов достигает 24-29 % и к его основанию снижается до 4-9 % [7]. По данным количественного анализа микроструктур по РЭМ-изображениям [4], проведенного с помощью ПО «STIMAN» [6], в поровом пространстве гидротермальных глин преобладают крупные (10-100 мкм) и мелкие межмикроагрегатные (1-10 мкм) микропоры. Их вклад в общую пористость значителен и достигает 70 %. Межультрамикроагрегатные (0,1-1 мкм) и межчастичные ( $< 0,1$  мкм) микропоры составляют 15-25 % и 1-3 % общей пористости, соответственно.

### Свойства гидротермальных глин

Гидротермальные глинистые грунты характеризуются высокими значениями естественной влажности, которая убывает с глубиной от 116-84 % в кровле - до 60-38 % в подошве толщи. Плотность грунтов имеет тенденцию к увеличению с глубиной от 1,38-1,43 до 1,65-1,70 г/см<sup>3</sup>. Пористость при этом изменяется от 75-81 до 39-45 %, соответственно. Число пластичности гидротермальных глинистых грунтов принимает значения в диапазоне от 2 до 55 %, консистенция вниз по разрезу меняется от скрытотекучей ( $1,04 < I_L < 3,00$ ) - до твердой ( $I_L < 0$ ).

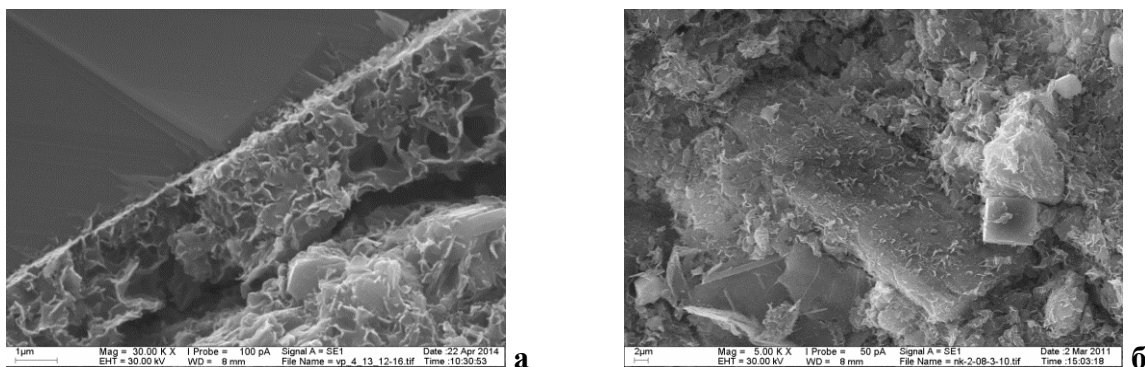
Большинство изученных образцов гидротермальных глинистых грунтов характеризуется высокой физико-химической активностью. Так, величина емкости катионного обмена достигает 110-140 мг-экв/100 г. Максимальная гигроскопическая влажность – 50-60 %. Удельная поверхность – 270-300 м<sup>2</sup>/г.

Изучение деформационных свойств позволяет классифицировать гидротермальные глинистые грунты как сильносжимаемые по всей толще. Модуль общей деформации гидротермальных глин изменяется от 0,14 до 3,27 МПа. Отмечается, что даже при нагрузках 0,2-0,3 МПа в грунте могут сохраняться макропоры и трещины [2]. При одноосном раздавливании практически все образцы гидротермальных глин разрушаются как хрупкопластичные тела, при этом прочность на одноосное сжатие изменяется от 0,05 до 0,14 МПа. Высокой прочно-

стью обладают даже глины, находящиеся в скрыто-текучем состоянии, т.е. те, которые переходят в текучее состояние при нарушении структурных связей. Это можно объяснить присутствием в грунтах структурных связей смешанного типа (фазовых и коагуляционных). Как правило, с увеличением глубины показатели прочностных и деформационных свойств грунтов несколько увеличиваются.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют описать закономерности изменения строения толщи гидротермальных глин. На первом этапе аргиллизации исходных пород поверхность преобразуемого минерального зерна замещается глинистыми минералами, контактирующими по базальным поверхностям. Затем вокруг новообразованных глинистых минералов формируется гидратная пленка. Ее толщина постепенно увеличивается, что сопровождается возрастанием расклинивающего давления между глинистыми частицами. Со временем глинистые частицы формируют сплошную высокопористую корочку на поверхности породообразующих минералов (рис. 3 а). Описанные выше стадии повторяются, приводя к полному преобразованию исходного минерального зерна (рис. 3 б). В гидротермальных глинах, наряду с участками микроструктур, в которых между структурными элементами преобладают ближние коагуляционные контакты, сохраняются многочисленные фрагменты глинистой матрицы и псевдоморфоз по зернам первичных минералов, между которыми преобладают фазовые контакты кристаллизационного типа.



**Рис. 3.** РЭМ-изображения участка поверхности образцов гидротермальных глинистых грунтов: а – контакт зерна плагиоклаза с «рубашкой» из глинистых частиц, увеличение 30000 раз; б – псевдоморфоза по кристаллу плагиоклаза, полностью замещенного смешанослойными минералами типа каолинит-сметит, увеличение 5000 раз

Таким образом, формируется грунт со смешанным типом контактов (фазовых и коагуляционных). Наличие фазовых контактов, наряду с коагуляционными, обуславливает повышенную структурную прочность гидротермальных глин и в ряде случаев определяет хрупкий и хрупкопластичный характер их разрушения.

Эволюция гидротермально-метасоматических процессов на термальных полях приводит к тому, что структурные элементы материнской породы полностью замещаются микроагрегатами глинистых минералов. Обычно этот процесс начинается на локальных участках (в очаговых зонах) аргиллизации: во всех изученных образцах наблюдается формирование минеральных наноструктур доменоподобного, глобулярно-пластинчатого, губчатого, ячеистого и смешанного типов, в зависимости от состава и морфологии наночастиц. В дальнейшем происходит разрастание и смыкание участков. Все это приводит к резкому возрастанию количества контактов между минеральными частицами. За счет повышения дисперсности происходит увеличение пористости и удельной поверхности. Улучшается сорбционная способность и гидрофильность гидротермальных глин, повышается их пластичность.

Особенности микроструктуры и характер структурных связей напрямую влияют на значения показателей физических и физико-химических свойств и в значительной степени определяют величину и характер прочностных и деформационных свойств гидротермальных глинистых грунтов.

Анализ полученных данных о составе, строении и свойствах гидротермальных глин позволяют охарактеризовать их как высокопористые ультрадисперсные минеральные микро- и наносистемы, в которых преобладают структурные связи смешанного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-05-00708а, 16-05-00971а, 16-05-00007а). Исследования проведены с применением оборудования, приобретенного в рамках реализации Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

#### Список литературы

1. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификации. М. 2011. 42 с.
2. Кузнецов Р.А., Булыгина Л.Г., Чернов М.С. Изменение строения гидротермальных глинистых грунтов при деформировании // *Материалы третьего Всероссийского совещания "Глины-2015"*. Москва: ИГЕМ РАН, 2015. С. 96-97.
3. *Лабораторные работы по грунтоведению* / Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. М.: Высш. шк., 2008. 519 с.
4. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород* / Под ред. академика Е. М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 211 с.
5. *Рычагов С.Н., Соколов В.Н., Чернов М.С. Гидротермальные глины геотермальных полей Южной Камчатки: новый подход и результаты исследований* // *Геохимия*. 2012. № 4. С. 378–392.
6. *Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В. Исследование микроструктуры грунтов с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений* // *Геоэкология*. 2008. № 4. С. 377- 382.
7. *Чернов М.С., Соколов В.Н., Крупская В.В., Алёшин А.Р. Наночастицы в гидротермальных глинах: состав, строение и свойства* // *Материалы третьего Всероссийского совещания "Глины-2015"*. Москва: ИГЕМ РАН, 2015. С. 113-115.