

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО ОСАЖДЕНИЯ КАЛЬЦИТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГРУНТОВ

Микробно-индуцированное осаждение кальцита – процесс цементирования с участием микроорганизмов, который улучшает геотехнические свойства горных пород в результате осаждения карбоната кальция, становится перспективным методом технической мелиорации грунтов. Эта технология в последние годы используется при производстве строительных материалов, создании водонепроницаемых барьеров, пленок для предотвращения утечек воды или загрязнителей из хранилищ. Как показано в лабораторных испытаниях, использование данной технологии приводит к увеличению жесткости грунта, снижению проницаемости и увеличению прочности на сдвиг. В данном исследовании представлена численная модель микробного осаждения кальцита для снижения проницаемости массива трещиноватых горных пород и предотвращения утечек из резервуаров для хранения  $\text{CO}_2$ . Результаты показывают, что проницаемость трещиноватых пород в радиусе 3 м может снизиться на порядок, и в три раза в радиусе 5 м от места инъекции. Проницаемость пород уменьшилась на два порядка от начального значения.

**Key words:** soil improvement; chemical properties; environmental engineering; remediation; soil stabilization; calcite precipitation; biocementation.

Интерес к технологиям использования биологических процессов в геотехнической практике резко возрос в последнее десятилетие [1]. Первый международный семинар по биогеотехнологии в 2007 г. способствовал междисциплинарному обсуждению и определению приоритетов научно-исследовательских тем в этой новой области [2]. Исследовательские программы по биогеотехнологии действуют более чем в 15 странах мира, выполнены серьезные исследования в этой области [3–8]. Второй международный семинар по биогеотехнологии был проведен в сентябре 2011 г. в Университете Кембриджа, собрал 35 ведущих исследователей в этой области и предоставил возможность оценить достигнутые результаты, наметить основные проблемы и пути их решения. Одной из перспективных биогеотехнологий является микробно-индуцированное осаждение кальцита (*microbially induced calcite precipitation* – MICP). Она используется при производстве кирпичей, создании непроницаемых барьеров, пленок для предотвращения утечек воды или загрязнителей из хранилищ, цементировании песка, в частности, с целью обеспечить повышенную безопасность для зданий, расположенных в сейсмически активных районах, в прибрежных зонах.

В настоящее время существуют две разновидности этой технологии: биоаугментация (микробы вводятся в грунты) и биостимуляция (стимулируются природные микробы). Биоаугментация, считается менее благоприятной для окружающей среды, чем биостимуляция, из-за введения экзогенных (non-native) микробов, в некоторых случаях это влечет за собой необходимость разрешений соответствующих контролирующих органов, значительные расходы, сложность практического использования. Биостимуляция считается более предпочтительной, так как проводится стимуляция роста микробов, которые адаптированы для этой среды, кроме того, это предполагает значительно меньше трудностей в практическом исполнении. Тем не менее существуют проблемы, связанные с получением равномерно обработанного грунтового массива, увеличением срока работ [9].

Исторически первым был способ биоаугментации, разработанный в Калифорнии. Метод предусматривает закачку во влажный грунт культуры микроорганиз-

ма *Sporosarcina pasteurii*. В ходе своей жизнедеятельности эта бактерия вырабатывает карбонат кальция – основной компонент известняков и мраморов, а также цемента. Таким образом дисперсные грунты в обработанной зоне постепенно приобретают свойства, близкие к песчаннику. Помимо сейсмической устойчивости, эта технология имеет и более очевидные применения, в том числе в борьбе с плывунами, подтоплением. Экспериментальная проверка предлагаемой методики проводилась в двухсотлитровых бочках, заполненных стерильным песком, к которому добавлялась бактериальная культура. В емкостях контролировалось: уровень необходимых для бактерий питательных веществ, содержание кислорода и другие параметры. *Sporosarcina pasteurii* известна своим свойством снижать кислотность почвы. Именно этот эффект приводит к тому, что ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ , растворенные в грунтовых водах, формируют нерастворимую соль, цементирующую грунт. Натурные испытания методики (рис. 1) выполнены в США [2, 3, 9–11], Нидерландах [12] и Японии [8], Сингапуре [4, 6, 13]. По результатам рекомендуется применение этой технологии при возведении дамб и набережных, стабилизации грунтов вокруг тоннелей. Более того, предлагается также использовать бактерии для предотвращения распространения с грунтовыми водами различных опасных для экологической обстановки загрязнений. Эксперты отмечают, что использование биологических методов представляется логическим продолжением развития в этих областях – от механических технологий (таких как «стена в грунте»), к чисто физическим (замораживание, обжиг) и физико-химическим методам (например, электросиликатизация).

Одним из наиболее перспективных направлений совершенствования технологии MICP является моделирование процесса, предсказание результатов, планирование эффективных сценариев процесса. В литературе предложено множество формулировок математических моделей, описывающих жизнедеятельность бактерий и сопутствующие физико-химические процессы. Один из первых вопросов, возникающих при математическом описании любого процесса, – выбор размерности модели; чаще всего строятся двумерные или одномерные модели процесса, реже трехмерные.

Математическая модель должна учитывать все наиболее значимые процессы, происходящие при осаждении кальцита. На рис. 2 показана схема основных хи-

мических реакций при микробном осаждении кальцита: гидролиз, кислотно-щелочное равновесие и осаждение кальцита.

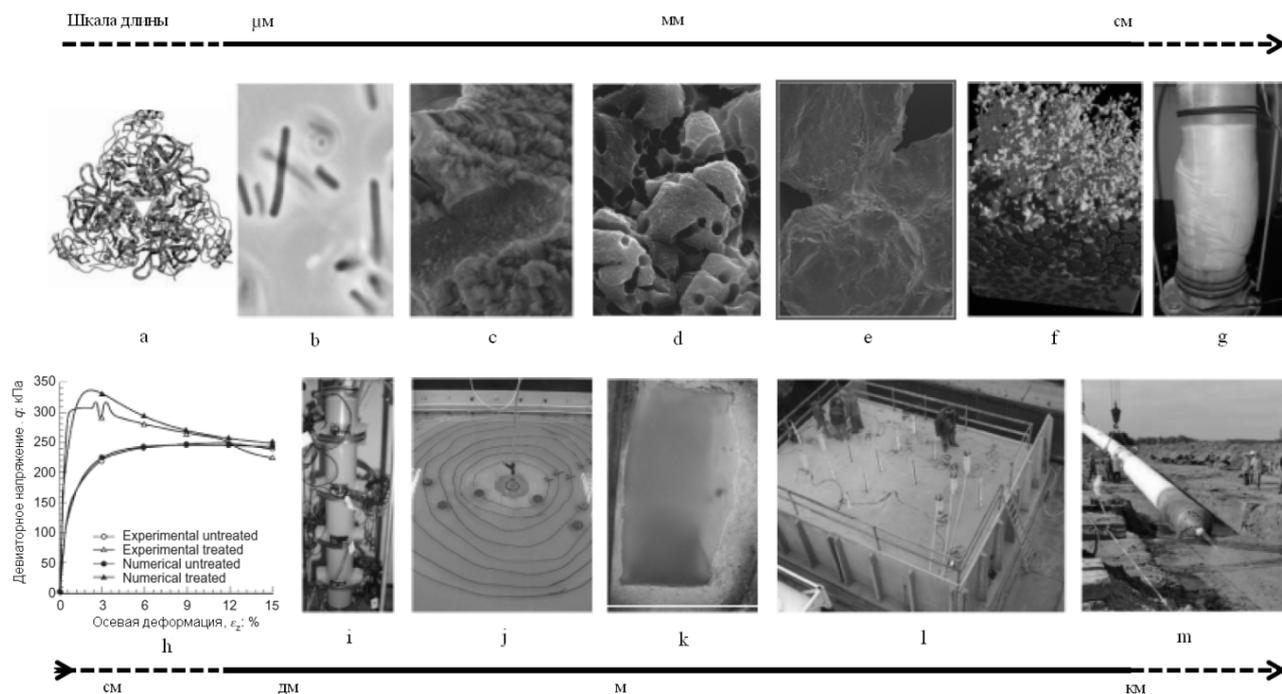


Рис. 1. Представление масштабов изучения МПСР [11]: *a* – структура фермента уреазы в пределах микробов; *b* – микробы *Sporosarcina pasteurii*; *c* – следы бактерий внутри осажденного кальцита; *d* – структура осажденного кальцита; *e* – зерна МПСР-цементированного песка; *f* – данные компьютерной томографии МПСР-цементированного песка; *g* – трехосные испытания МПСР-цементированного образца; *h* – моделирование трехосного испытания на сжатие МПСР-образца; *i* – испытание образца методом резонансной колонки [9]; *j* – исследование радиального потока [14]; *k* – непроницаемый кожух МПСР для водохранилища местного стока [13]; *l* – МПСР обработка 100 м³ песка [12]; *m* – полевые испытания

Мочевина под влиянием уреазы, фермента, вырабатываемого некоторыми бактериями, подвергается гидролизу с образованием аммиака и угольной кислоты. Уреаза – это белок, состоящий из аминокислот, который ускоряет химическую реакцию, специфичность этого белка заключается в том, что он разлагает только мочевину. В растворах, содержащих угольную кислоту, создается сложная равновесная система с появлением карбонат-иона, который в присутствии ионов кальция приводит к осаждению кристаллов кальцита.

Моделирование проводилось в рамках исследования по захоронению углекислого газа  $\text{CO}_2$  в геологических формациях. Основные глубины захоронения  $\text{CO}_2$ : 800–1 000 м для обеспечения необходимого давления, при котором  $\text{CO}_2$  находится в жидком состоянии. Чтобы предотвратить выход  $\text{CO}_2$  на поверхность, геологические формации должны быть покрыты непроницаемым слоем, так называемой крышкой. В то же время инъекция  $\text{CO}_2$  должна происходить путем бурения скважины через непроницаемый слой, что в свою очередь может вызывать образование трещин в непроницаемом слое. Основная идея закупорки трещин заключается в использовании био-индуцированного кальцита, который будет внедряться в открытые поры, что по своей сути равносильно внедрению цемента. Основное отличие био-индуцированного кальцита от обычного цемента в том, что в первом случае кальцит будет производиться на месте. Чтобы показать возможность применения этих технологий в полевых условиях, необходимы значительные

финансовые затраты. Большое количество компонентов, взаимодействующих друг с другом, предполагает сложные вычисления для выполнения экспериментов, поэтому для проведения этих дорогих экспериментов необходима компьютерная модель, с помощью которой можно предсказать необходимые стадии внедрения Са и другие экспериментальные параметры.

Биологическое цементование непроницаемого слоя, поврежденного в процессе бурения, также представляется перспективным, так как является простым и недорогим способом увеличения запаса захороненного  $\text{CO}_2$  в горных породах. Введение бактерий в горную породу и постепенный гидролиз мочевины, катализируемой бактерией, ведут к осаждению кальцита, который распределяется шире и более гомогенно по сравнению с прямой инъекцией в основание, когда пропускная способность канала резко снижается из-за немедленного осаждения Са в зоне инъекции.

При оптимизации процесса биоцементации важно оценить влияние концентрации биомассы на количество осаждаемого кальцита при различных схемах внедрения биомассы. Для наиболее полного описания процесса предложена объединенная биолого-химическая модель, включающая ключевые микробиологические и химические реакции. Система состоит из двух жидких фаз (рассол и  $\text{CO}_2$ ), трех твердых фаз (пористая горная порода, биопленки, кальцит) и взвешенных растворенных компонентов. Биопленки рассматриваются как множество микроорганизмов, расположен-

ных на какой-либо поверхности, клетки которых прикреплены друг к другу. Обычно клетки погружены в выделяемое ими внеклеточное полимерное вещество (внеклеточный матрикс) – слизь [16].

Основные допущения модели следующие. К компонентам модели относятся вода (*w*), углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), взвешенная биомасса (*b*), биопленки (*f*), субстрат (*s*), акцептор электронов – кислород (*e*), кальцит (*c*), мочевины (*u*), аммиак / аммоний (*a*), ионы кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), хлора ( $\text{Cl}^-$ ) и натрия ( $\text{Na}^+$ ).

В порах пористой среды могут присутствовать две жидкие фазы (рассол [*w*] и углекислый газ  $\text{CO}_2$  [*n*]), которые соответственно смачивают и не смачивают твердые поверхности. Рассол состоит из воды, углерода и второстепенных компонентов: натрия, хлора, кальция, биомассы, субстрата, кислорода, мочевины и общего азота. В рассоле могут находиться разные соли, но предполагается, что их совокупное воздействие на плотность, вязкость и растворимость  $\text{CO}_2$  могут быть представлены в виде эквивалентной концентрации хлорида натрия.

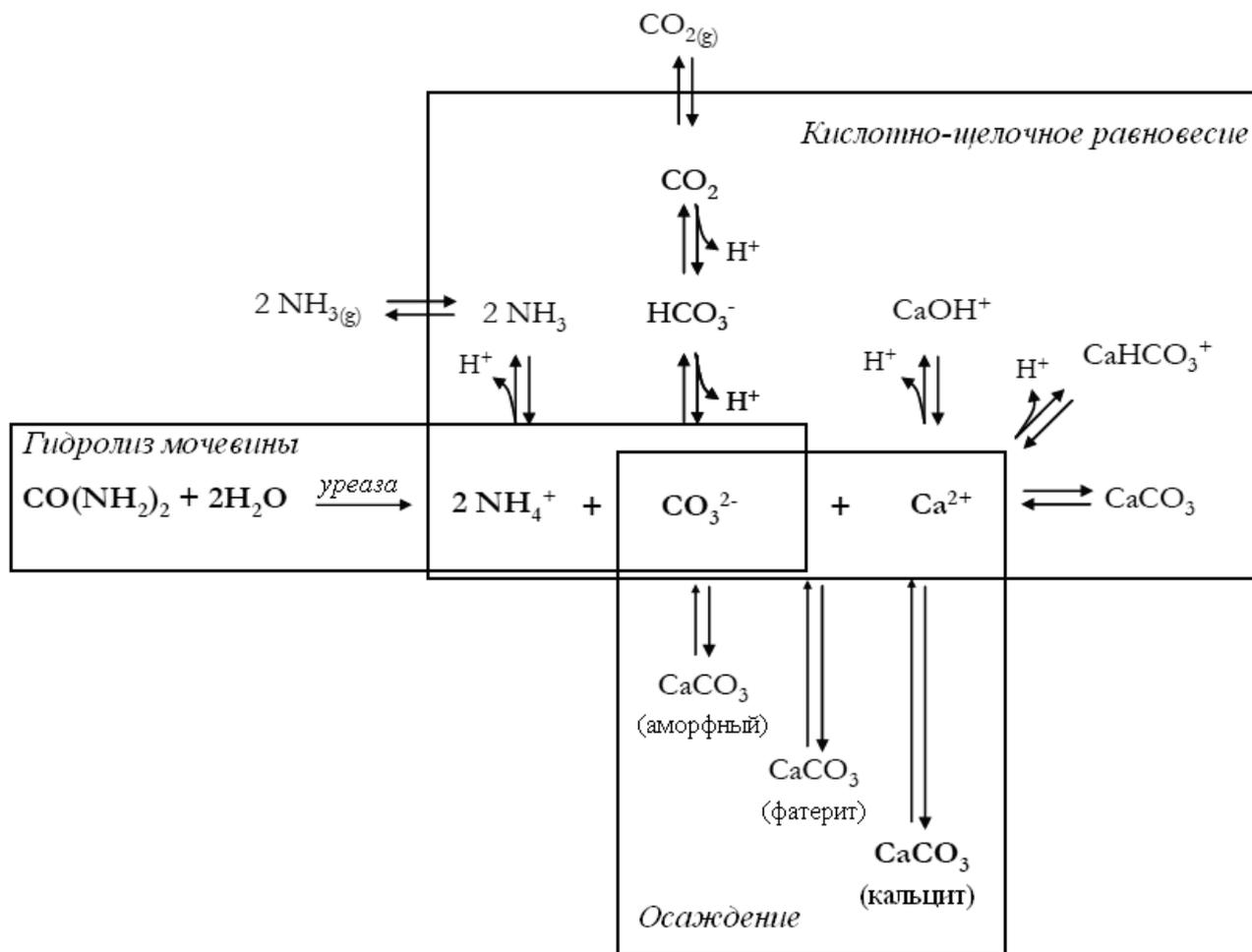


Рис. 2. Химические реакции при микробном осаждении кальцита: гидролиз, кислотно-щелочное равновесие и осаждение кальцита [12]

В газовой фазе может находиться вода,  $\text{CO}_2$  и кислород. Массы всех других компонентов в газовой фазе незначительны, поэтому предполагается, что эти компоненты не растворяются в газовой фазе. Массовая доля вторичных компонентов рассчитывается с использованием закона действующих масс, поэтому они должны быть в равновесии с их соответствующими первичными компонентами. Вторичными компонентами в модели являются углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), бикарбонат ( $\text{HCO}_3^-$ ) и карбонат ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) как составные части общего углерода  $\text{C}_{\text{Tot}}$ , аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и аммоний ( $\text{NH}_4^+$ ) как составные части общего азота  $\text{NH}_{\text{Tot}}$  и ионы водорода и гидроксид-ионы как составные части воды.

Подробное представление реакций (гидролиза мочевины, осаждения, растворения) и бактериальной активности дано в работах [16].

При создании компьютерной модели использована программа DuMu<sup>x</sup> (Штутгартский университет, Гер-

мания), которая допускает вариации различных нелинейных комбинаций параметров, с управлением временных интервалов, что в свою очередь увеличивает эффективность моделирования. Все расчеты были выполнены для радиального домена с горизонтальной трещиной посередине. Для простоты трещина была реализована как сильнопроницаемый слой толщиной 5 см и длиной 5 м. Высота и радиус домена по 10 м, угол при вершине 22,5° (рис. 3). Домен предполагается радиально-симметричным.

Начальные условия: гидростатическое давление в середине домена  $p_w = 1,79$  МПа и плотность рассола 1 087 кг/м<sup>3</sup>. На внешнем радиусе модели выбрана граница 1-го рода (*Dirichlet boundary*, рис. 4). Заданы начальные значения концентраций  $\text{Ca}^{2+}$ , мочевины,  $\text{NH}_{\text{Tot}}$ ,  $\text{O}_2$ , взвешенной биомассы и субстрата равными нулю,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  равны 0,007 моль/моль, молярная доля  $\text{C}_{\text{Tot}}$  равен  $1,79 \cdot 10^{-7}$ .

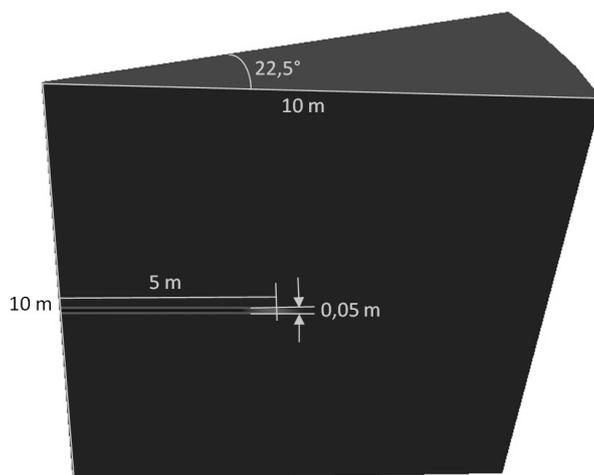


Рис. 3. Расчетный элемент со слоем с высокой проницаемостью в середине

Граничные условия 2-го рода (*Neumann boundary*) приняты на поверхности и в основании домена, а также в позиции минимального радиуса, за исключением небольшой области для инъекций (*Injection*) в середине

домена. Поскольку инъекция осуществлялась для наблюдения за осаждением кальцита и изменением проницаемости трещины, размеры сетки уменьшаются в сторону трещины и снижения радиуса.

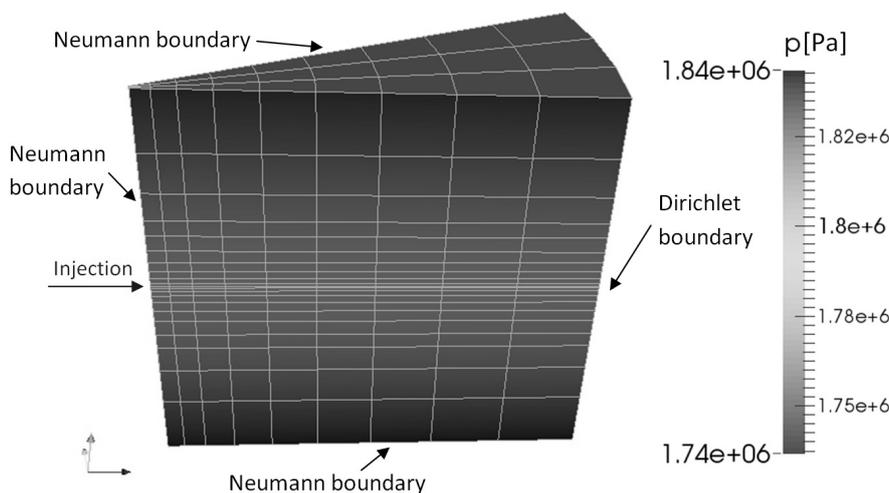


Рис. 4. Схема домена моделирования с распределением гидростатического давления

Проницаемость трещины, равная  $1,645 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ , была установлена моделированием исходя из экспериментально установленного давления закачки воды, равного 3,79 МПа, спустя 4 ч от начала опыта при постоянной скорости закачки, равной  $3,1545 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ .

**Результаты моделирования.** Бактерии *Sporosarcina pasteurii* требуют специальные условия для роста и распада. Для подбора рационального режима МІСР с заданной интенсивностью осаждения кальцита и места его расположения нами осуществлялось моделирование с помощью различных схем инъекций. В таблице представлены порядок и длительность проведения инъекций. Бактерии в качестве источника энергии должны иметь субстрат, кислород как акцептор электронов и углерод для обмена и роста, поэтому эти компоненты дозируются в промывочной жидкости. На первом этапе с раствором вводятся бактерии. Затем инъекции отключаются на 15,7 ч. Это время необходимо для того, чтобы бактерии прикрепилась к твердой поверхности или друг к другу и вырастили биопленки. Далее нагнетается раствор, насыщенный мочевиной, для роста биопленок и производства фер-

мента уреазы. Гидролиз мочевины сопровождается образованием аммиака и углекислого газа, который распадается до карбонат-ионов и воды. Заканчивается процесс инъекцией, насыщенной кальцием, необходимым для осаждения кальцита.

На рис. 5 показано изменение рН в разные моменты времени. Повышение рН может наблюдаться при  $t_2 = 39,52$  ч после инъекций, насыщенных мочевиной. После прекращения инъекций с мочевиной ( $t_3 = 44,52$  и  $t_4 = 52,52$  ч) рН снижается из-за осаждения кальцита. В конце моделирования в момент времени  $t_5 = 66,90$  ч рН уменьшается, так как прекращаются диссоциация, осаждение кальцита, наблюдается только перемешивание жидкой фазы.

На рис. 6, а показано распределение массовой доли взвешенной биомассы в рассоле в конце моделирования. Увеличение содержания взвешенной биомассы видно вокруг трещины, но внутри трещины массовая доля взвешенной биомассы снижается из-за прикрепления микроорганизмов к твердотельной матрице и инъекции, не содержащей бактерий.

Схемы инъекции. Вводимые компоненты  $k$  представлены в виде [моль/моль] или [г/л]

Инъекция	Продолжительность, ч	$C_{\text{Tot}}$ , моль/моль	$C^{\text{Na}^+}$ , г/л	$C^{\text{Ca}^{2+}}$ , г/л	$C^{\text{u}}$ , г/л	$C^{\text{NH}_4^{\text{Tot}}}$ , г/л	$C^{\text{O}_2}$ , г/л	$C^{\text{Cl}^-}$ , г/л	$C^{\text{s}}$ , г/л	$C^{\text{b}}$ , г/л
Промывание с бактерией	0,82	$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00379			3,184	0,008	3,184	3	0,04
Нет потока	15,7				0					
С мочевиной	12	$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00379		20	3,184	0,008	3,184	3	
Нет потока	11				0					
Промывание	1	$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00379			3,184	0,008	3,184	3	
С кальцием	12	$3,9 \cdot 10^{-7}$	0,00012	13,5072	20	3,184	0,008	3,184	3	
Нет потока	14,38				0					

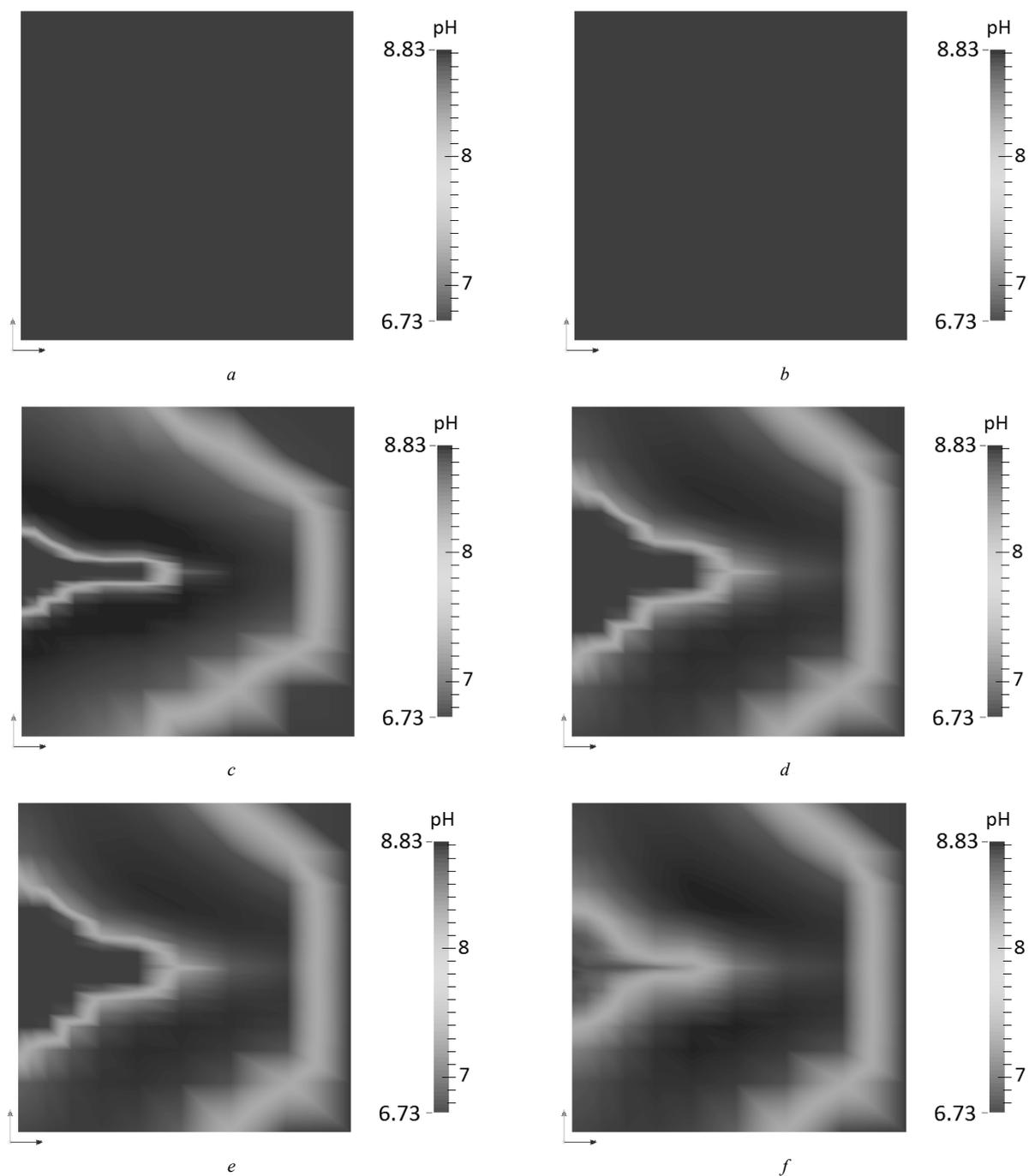


Рис. 5. Изменения pH:  $a$  – в начальный момент времени  $t_0 = 0$  ч;  $b$  – после инъекции бактерий  $t_1 = 16,52$  ч;  $c$  – после инъекций, насыщенных мочевиной,  $t_2 = 39,52$  ч;  $d$  – в течение инъекций, насыщенных кальцием,  $t_3 = 44,52$  ч;  $e$  – после инъекций с кальцием,  $t_4 = 52,52$  ч;  $f$  – в конце моделирования  $t_5 = 66,90$  ч

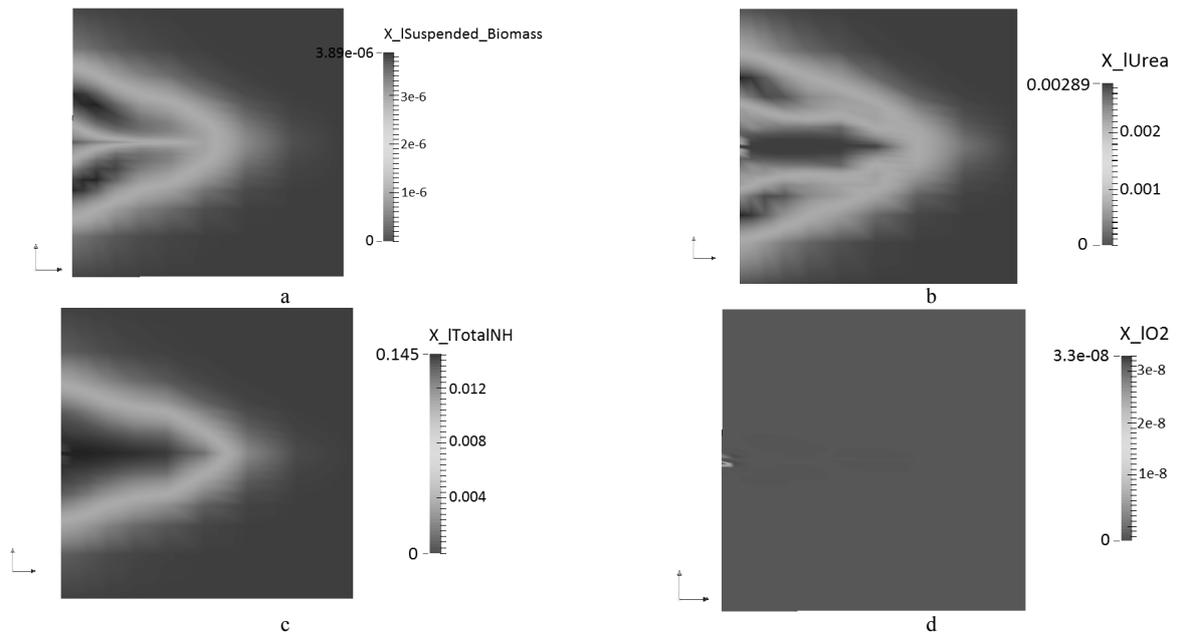


Рис. 6. Массовые доли: *a* – взвешенной биомассы; *b* – мочевины; *c* – общего азота; *d* – кислорода в жидкой фазе в конце моделирования MICP

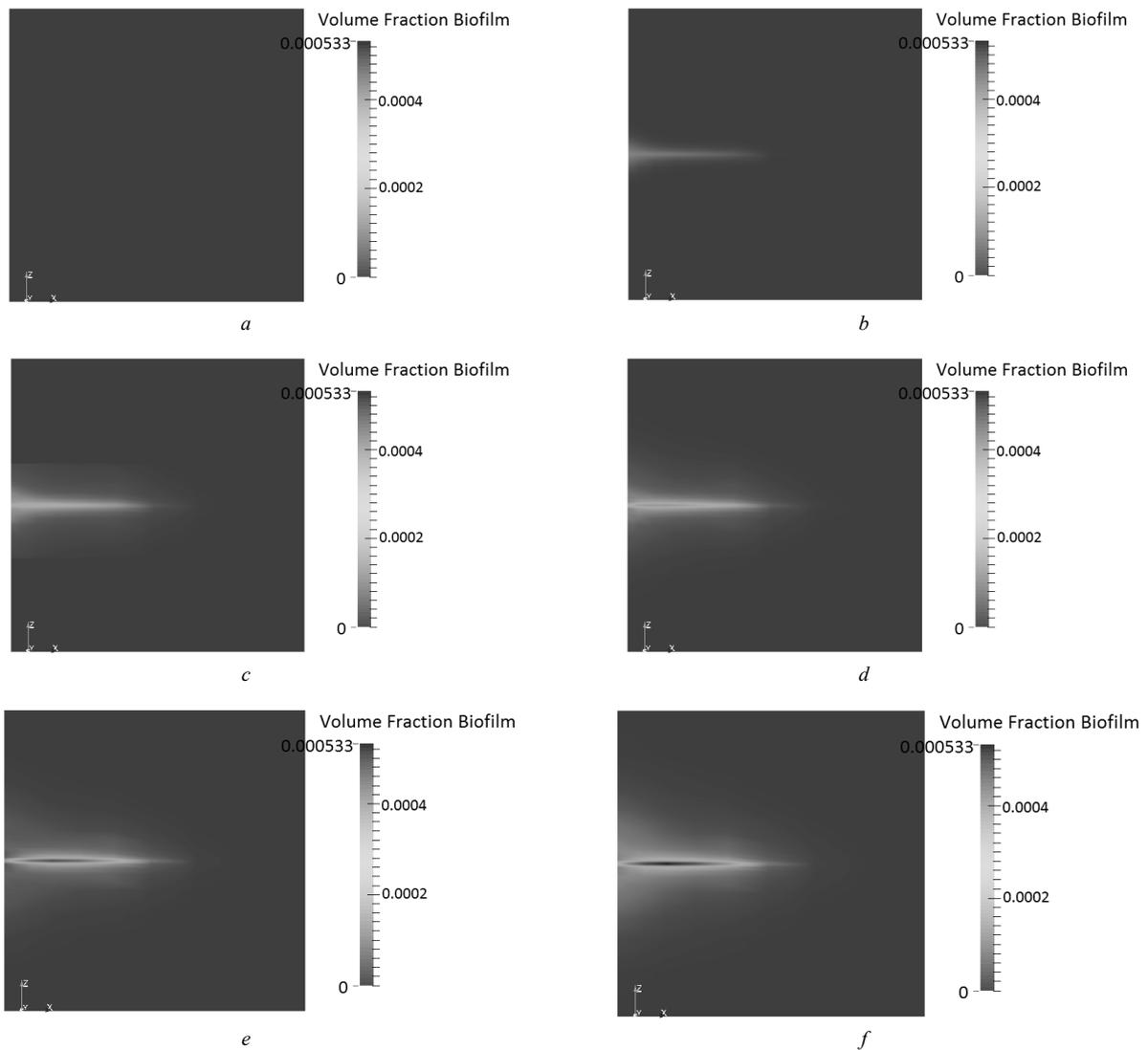


Рис. 7. Объемная доля биопленки в разное время: *a* – в начальный момент времени  $t_0 = 0$  ч; *b* – после инъекции бактерий  $t_1 = 16,52$  ч; *c* – после инъекций, насыщенных мочевиной,  $t_2 = 39,52$  ч; *d* – в течение инъекций, насыщенных кальцием,  $t_3 = 44,52$  ч; *e* – после инъекций, насыщенных кальцием,  $t_4 = 52,52$  ч; *f* – в конце моделирования  $t_5 = 66,90$  ч

После инъекций, насыщенных мочевиной, массовая доля мочевины уменьшается из-за его гидролиза. На рис. 6, *b* показано снижение мочевины в трещине в конце моделирования. Массовая доля общего азота состоит в основном из аммония, который образовался из-за протонирования аммиака при гидролизе мочевины, влияя на pH. Уменьшение массовой доли мочевины в системе приводит к увеличению  $NH_{Tot}$ , поэтому снижение массовой доли мочевины на рис. 6, *b* коррелирует с увеличением массовой доли  $NH_{Tot}$  на рис. 6, *c*. На рис. 6, *d* показано распределение массовой доли кислорода в рассоле. Количество кислорода в системе в конце моделирования практически

равно нулю, это означает, что бактерии полностью потребили кислород.

Объемные доли биопленки и кальцита в разное время действия показаны на рис. 7 и 8. Объемная доля биопленки становится видимой при  $t_1 = 16,52$  ч после инъекции бактерий. Бактерии присоединяются к твердым поверхностям и биопленке. Объемная доля биопленки с течением времени увеличивается и достигает максимального значения в конце моделирования на момент времени  $t_5 = 66,90$  ч. Объемная доля кальцита появляется после инъекций, насыщенных кальцием  $t_3 = 44,52$  ч. Она с течением времени увеличивается и достигает максимального значения в конце моделирования.

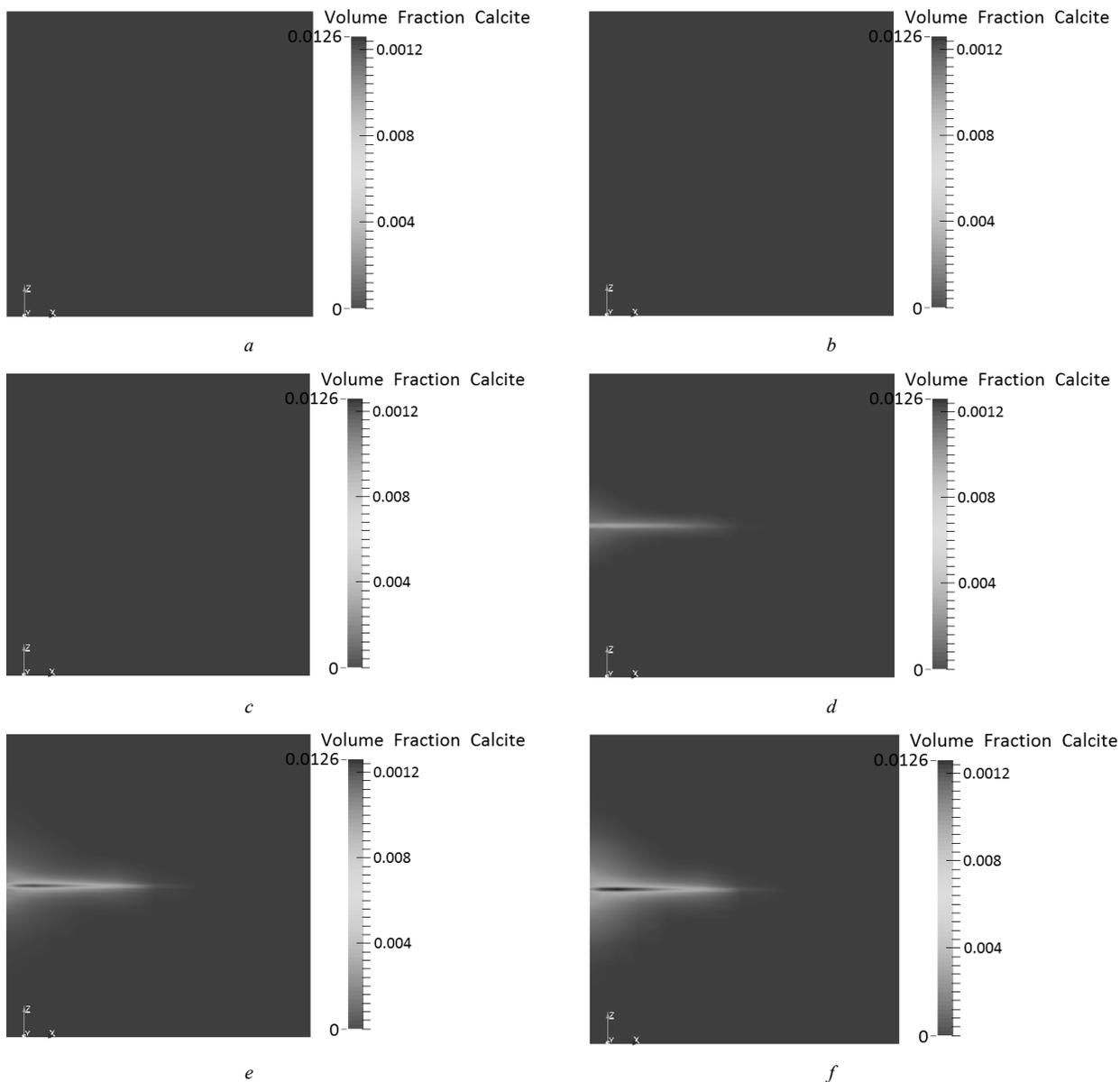


Рис. 8: Объемная доля кальцита в разное время действия: *a* – в начальный момент времени  $t_0 = 0$  ч; *b* – после инъекции бактерий  $t_1 = 16,52$  ч; *c* – после инъекций, насыщенных мочевиной,  $t_2 = 39,52$  ч; *d* – в течение инъекций, насыщенных кальцием,  $t_3 = 44,52$  ч; *e* – после инъекций, насыщенных кальцием,  $t_4 = 52,52$  ч; *f* – в конце моделирования  $t_5 = 66,90$  ч

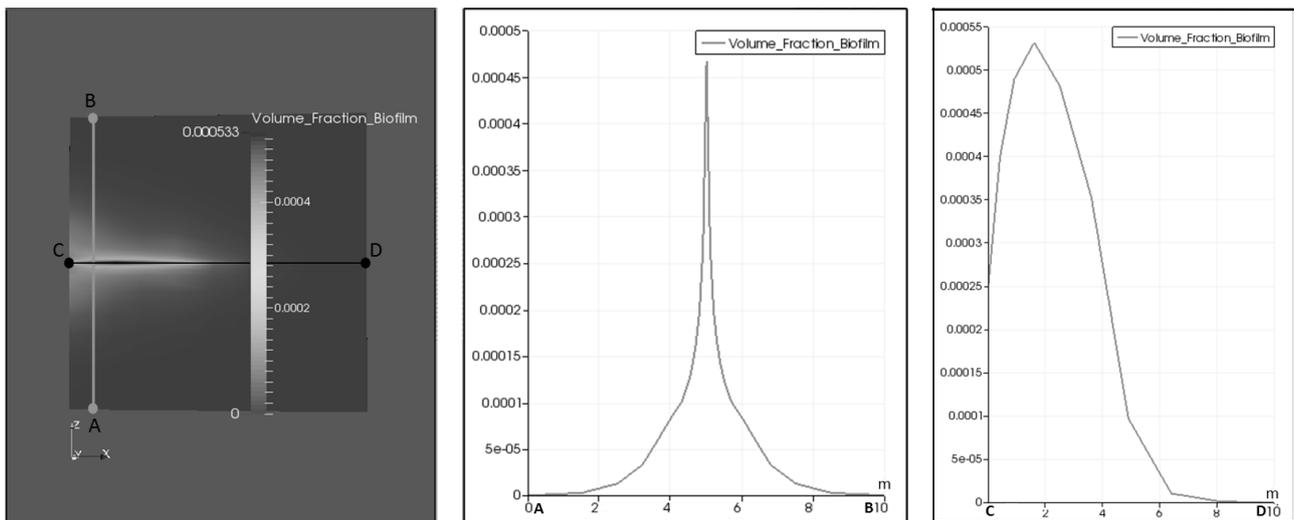


Рис. 9. Объемная доля биопленки в конце МСР моделирования (слева). Разрез по линии А–В перпендикулярно трещине (в середине) и разрез вдоль трещины С–D (справа)

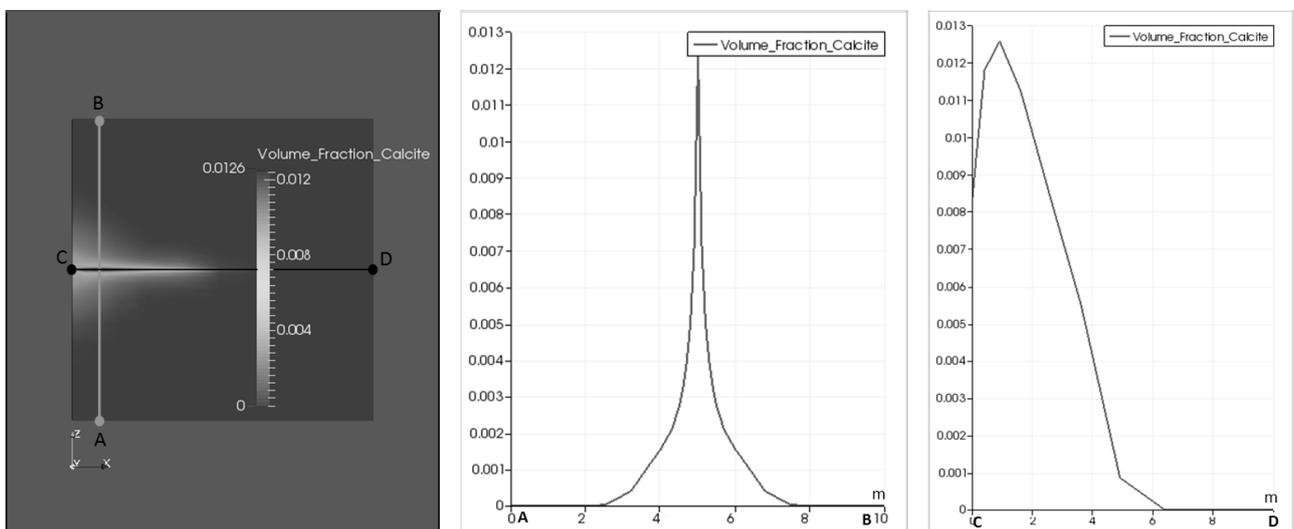


Рис. 10. Объемная доля кальцита в конце моделирования (слева). Разрез по линии А–В перпендикулярно к трещине (в середине) и разрез вдоль трещины С–D (справа)

Объемные доли биопленки и кальцита в конце моделирования показаны на рис. 9 и 10. Разрезы по линии А–В перпендикулярно трещине показывают разницу между объемными долями биопленки и кальцита в трещине и в окружающей породе. Наибольшее значение объемной доли биопленки находится на расстоянии 2 м от места инъекции (линия С–D). Самая высокая концентрация кальцита наблюдается на расстоянии 1 м от места инъекции (линия С–D). Максимальное значение объемных фракций не достигается в позиции инъекции из-за высокого давления, за счет которого вымываются внедряемые компоненты. Кроме того, из-за высокого градиента давления биопленки вблизи места инъекции отсоединяются от твердой фазы.

На рис. 11 показано уменьшение проницаемости во времени. Проницаемость начинает уменьшаться в течение инъекций, насыщенных кальцием, из-за осаждения карбоната кальция с  $t_3 = 44,52$  ч. Макси-

мальное снижение проницаемости наблюдается в конце моделирования.

Увеличение объемной доли кальцита коррелирует с уменьшением проницаемости (рис. 12). Разрез вдоль трещины (по линии С–D) показывает наименьшее значение проницаемости на расстоянии 1 м от места инъекции, которая соответствует позиции самого высокого значения объемной доли кальцита. Проницаемость снизилась почти на два порядка: от начального значения  $K = 1,645 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  до значения  $K = 7,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ . В радиусе 3 м от места инъекции проницаемость уменьшается на порядок и равна  $K = 2,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ , в радиусе 5 м проницаемость уменьшается в три раза,  $K = 5,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ . Разрез по линии А–В показывает, что проницаемость горной породы уменьшается также в непосредственной близости от трещины от  $K = 1,09 \cdot 10^{-14}$  до  $K = 3,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ , из-за осаждения кальцита в горной породе.

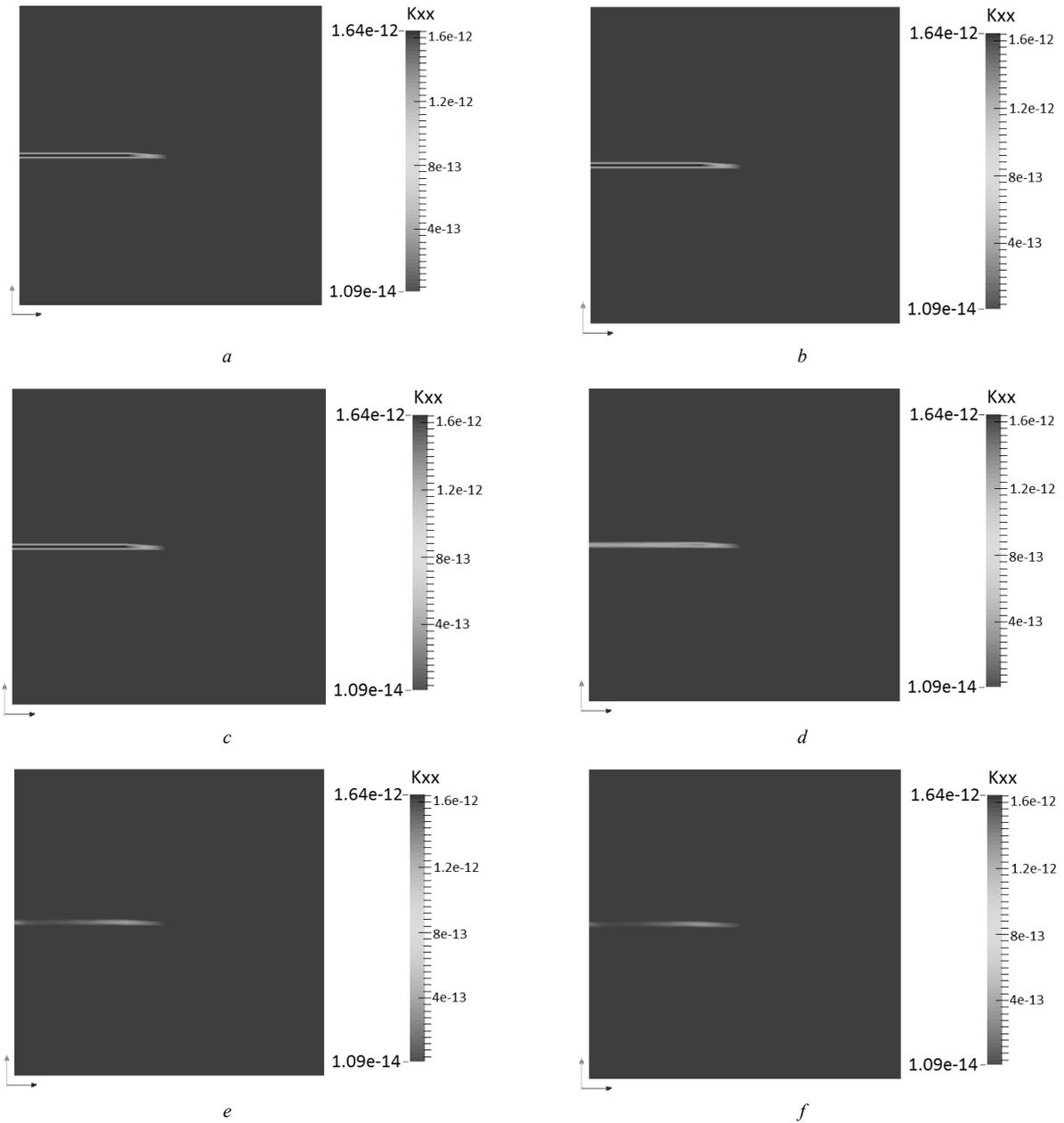


Рис. 11. Изменения проницаемости во времени: *a* – в начальный момент времени,  $t_0 = 0$  ч; *b* – после инъекции бактерий,  $t_1 = 16,52$  ч; *c* – после инъекций, насыщенных мочевиной,  $t_2 = 39,52$  ч; *d* – в течение инъекций, насыщенных кальцием,  $t_3 = 44,52$  ч; *e* – после инъекций, насыщенных кальцием,  $t_4 = 52,52$  ч; *f* – в конце моделирования,  $t_5 = 66,90$  ч

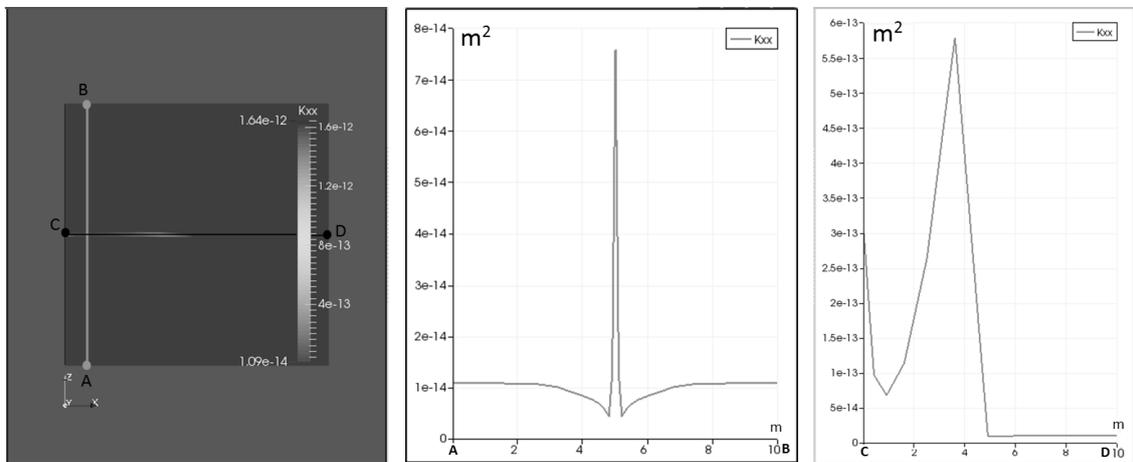


Рис. 12. Изменение проницаемости в конце MICP моделирования (слева). Разрез по линии А–В перпендикулярно к трещине (в середине) и разрез вдоль трещины С–D (справа)

**Выводы.** Технология МІСР является возможным путем повышения безопасности хранения CO<sub>2</sub>, но исследования этой методики полевыми экспериментами могут быть дорогими. Численное моделирование – это основной способ предсказать поведение системы. Представленное исследование сделано для оценки осаждения кальцита в натуральном масштабе. Моделирование проводилось с помощью 3D домена. По результатам моделирования показано, что проницаемость трещины может снизиться на порядок в радиусе 3 м и в 3 раза в радиусе 5 м от места инъекции. Максимально проницаемость снизилась на два порядка от начального значения. Моделирование показало хорошие результаты по снижению проницаемости трещины, что позволит избежать утечки CO<sub>2</sub> из хранилища, но эти результаты могут отличаться от экспериментальных измерений из-за введенных допущений. Для обеспечения точности и достоверности результатов МІСР необходимо продолжить проверки существующей модели.

Идентификация различных технологических ограничений, таких как активность бактерий, скорость реакций, позволяют контролировать процесс МІСР для его использования в геотехнической практике. Количество приложений МІСР-технологий неуклонно возрастает в последние годы – от улучшения механических и фильтрационных свойств горных пород до

иммобилизации тяжелых металлов и углекислого газа. Проведенные экспериментальные исследования, численное моделирование обеспечили значительный прогресс в понимании и контроле процесса МІСР на объектах разного уровня, от микро до макро.

Дальнейшее развитие в этой области включает: оценку компонентов подземной экосистемы и их взаимодействие; картографирование и моделирование изменчивости структуры, состава горных пород и подземных вод, их динамики, а также бактериального разнообразия; совершенствование техники для мониторинга за процессом биоцементирования горных пород в режиме реального времени. Укрупнение задач требует обширных экспериментальных работ, тестирования гипотез благодаря присущей сложности природных систем. Экспериментальная работа должна быть дополнена строгими аналитическими решениями и численным моделированием для определения принципов управления природно-техногенной системой. Междисциплинарные исследования требуют большего взаимодействия между учеными и инженерами, формирования междисциплинарных рабочих групп и отделов. Последнее обстоятельство определяет подходы к подготовке специалистов нового поколения, способных использовать свой опыт и знания при работе в междисциплинарной команде.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Mitchell J.K., Santamarina J.C. Biological considerations in geotechnical engineering // J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2005. Vol. 131 (10). P. 1222–1233.
- DeJong J.T., Mortensen B., Martinez B. Bio-soils interdisciplinary science and engineering initiative // Final Report on Workshop. 84 pp. Arlington, VA, USA : National Science Foundation, 2007.
- DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Bio-mediated soil improvement // Ecol. Eng. 2010. Vol. 36 (2). P. 197–210.
- Ivanov V., Chu J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2008. Vol. 7 (2). P. 139–153.
- Karatas I., Kavazanjian E., Rittmann B.E. Microbially induced precipitation of calcite using pseudomonas denitrificans // 1<sup>st</sup> International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering, Netherlands. June 23–25. 2008. P. 58–66.
- Ivanov V. Microbial geotechniques. In Environmental microbiology for engineers. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2010. P. 279–286.
- Seagren E.A., Aydilek A.H. Biomediated geomechanical processes. In Environmental microbiology. 2nd edn / eds. by R. Mitchell and J.-D. Gu. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2010. P. 319–348.
- Hata T., Tsukamoto M., Mori H., Kuwano R., Gourc J.P. Evaluation of multiple soil improvement techniques based on microbial functions // Proc. GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering. Dallas, TX : ASCE Geotechnical Special Publication, 2011. 211. P. 3945–3955.
- Martinez B.C. Experimental and numerical upscaling of MICP for soil improvement. Doctoral dissertation, University of California. Davis, CA, USA, 2012.
- Cunningham A.B., Gerlach R., Spangler L., Mitchell A.C., Parks S., Phillips A. Reducing the risk of well bore leakage of CO<sub>2</sub> using engineered biomineralization barriers // Energy Procedia. 2011. Vol. 4. P. 5178–5185.
- DeJong J.T. et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges // Géotechnique. 2013. Vol. 63, No. 4. P. 287–301.
- Van Paassen L.A., Ghose R., van der Linden T.J.M., van der Star W.R.L., van Loosdrecht M.C.M. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment // ASCE J. Geotech. Geoenviron. Engng. 2010. Vol. 136, No. 12. P. 1721–1728.
- Stabnikov V., Naeimi M., Ivanov V., Chu J. Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement // Cement Concrete Res. 2011. Vol. 41, No. 11. P. 1143–1149.
- Al Qabany A. Microbial carbonate precipitation in soils. Doctoral dissertation. University of Cambridge, UK, 2011.
- Flemisch B., Darcis M., Erbertseder K., Faigle B., Lauser A., Mosthaf K., Muthing S., Nuske P., Tatomir A., Wolff M., Helmig R. DuMu<sup>x</sup>: DUNE for Multi-Phase, Component, Scale Physics, Flow and Transport in Porous Media // Advances in Water Resources. 2011. Vol. 34 (9). P. 1102–1112.
- Ebigbo A., Phillips A., Gerlach R., Helmig R., Cunningham A. B., Class H., Spangler L.H. Darcy-scale modeling of microbially induced carbonate mineral precipitation in sand columns // Water Resources Research. 2012. Vol. 48 (7).

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 16 октября 2014 г.

#### NUMERICAL INVESTIGATION OF MICROBIALY INDUCED CALCITE PRECIPITATION AND ITS INFLUENCE ON THE PERMEABILITY OF SOIL

*Tomsk State University Journal*, 2014, 389, pp. 252–262. DOI: 10.17223/15617793/389/42

**Shigorina Elena G.** Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: elenashigorina@gmail.com

**Strokova Ludmila A.** Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: strokova@sibmail.com

**Keywords:** chemical properties; environmental engineering; remediation; soil stabilization; calcite precipitation; soil improvement; biocementation.

Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), a bio-mediated cementation process that improves the geotechnical properties of soils through the precipitation of calcium carbonate, is becoming a promising alternative to traditional soil improvement methods. This technology in recent years has been used in the production of building materials, construction of waterproof barriers, biofilm to prevent water leaks or pollutant leaks from storage. Other geotechnical applications currently being explored include cementation of sands to enhance bearing capacity and liquefaction resistance, soil erosion control and remediation of soil and groundwater impacted by metals and radionuclides. Challenges in bio-mediated ground modification include upscaling processes from the laboratory to the field, in situ monitoring of reactions, reaction products and properties, developing integrated biogeochemical and geotechnical models, management of treatment by-products, establishing the durability and longevity/reversibility of the process. MICP has been shown to increase soil stiffness, reduce permeability and increase shear strength in laboratory experiments. The current study presents the numerical model for microbially induced calcite precipitation predicting the reduction of permeability over time due to biomineralization in the fracture of rocks and prevention of leakage from CO<sub>2</sub> storage reservoirs. The results show the permeability of the fracture-layer can decrease by one order of magnitude in a radius of 3 meters and by the factor of 3 in a radius of 5 meters from injection position. The maximum reduction of permeability was nearly by two orders of magnitude from the initial value. Identification of different process limitations, such as bacterial activity and reaction rates, enables the control of MICP for its use in geotechnical engineering. The primary challenges in this area include assessment of subsurface ecosystems and their interaction with the available fluids and minerals, mapping and modelling of subsurface variability of pore structure, mineralogy, ground water flow and transport and bacterial diversity. Techniques for real-time monitoring require improvement. Upscaling requires extensive experimental work that is hypothesis-driven owing to the inherent complexity of natural systems. The experimental work must be complemented by rigorous analytical and numerical modelling to identify the first-order principles controlling the system. Interdisciplinary research requires greater interaction between scientists and engineers, formation of interdisciplinary work groups and departments.

#### REFERENCES

- Mitchell J.K., Santamarina J.C. Biological considerations in geotechnical engineering. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2005, vol. 131(10), pp. 1222-1233. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222)
- DeJong J.T., Mortensen B., Martinez B. *Bio-soils interdisciplinary science and engineering initiative. Final Report on Workshop*. Arlington, VA, USA: National Science Foundation, 2007. 84 pp.
- DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Bio-mediated soil improvement. *Ecol. Eng.*, 2010, vol. 36(2), pp. 197-210. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.029
- Ivanov V., Chu J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 2008, vol. 7(2), pp. 139-153. DOI: 10.1007/s11157-007-9126-3
- Karatas I., Kavazanjian E., Rittmann B.E. *Microbially induced precipitation of calcite using pseudomonas denitrificans*. 1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering, Netherlands. June 23-25. 2008, pp. 58-66.
- Ivanov V. *Microbial geotechniques*. In: *Environmental microbiology for engineers*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010, pp. 279-286.
- Seagren E.A., Aydilek A.H. *Biomediated geomechanical processes*. In: Mitchell R. and Hoboken J.-D. (eds.) *Environmental microbiology*. 2nd edition. Gu., NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010, pp. 319-348.
- Hata T., Tsukamoto M., Mori H., Kuwano R., Gourc J.P. Evaluation of multiple soil improvement techniques based on microbial functions. *GeoFrontiers*, 2011, 211, pp. 3945-3955. DOI: 10.1061/41165(397)403
- Martinez B.C. *Experimental and numerical upscaling of MICP for soil improvement*. Doctoral dissertation, University of California. Davis, CA, USA, 2012.
- Cunningham A.B., Gerlach R., Spangler L., Mitchell A.C., Parks S., Phillips A. Reducing the risk of well bore leakage of CO<sub>2</sub> using engineered biomineralization barriers. *Energy Procedia*, 2011, vol. 4, pp. 5178-5185. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.495
- DeJong J.T. et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 2013, vol. 63, no. 4, pp. 287-301. DOI: 10.1680/geot.SIP13.P.017
- Van Paassen L.A., Ghose R., van der Linden T.J.M., van der Star W.R.L., van Loosdrecht M.C.M. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Engng.*, 2010, vol. 136, No. 12, pp. 1721-1728. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000382
- Stabnikov V., Naeimi M., Ivanov V., Chu J. Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement. *Cement Concrete Res.*, 2011, vol. 41, no. 11, pp. 1143-1149. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.06.017
- Al Qabany A. *Microbial carbonate precipitation in soils*. Doctoral dissertation. University of Cambridge, UK, 2011.
- Flemisch B., Darcis M., Erbertseder K., Faigl B., Lauser A., Mosthaf K., Muthing S., Nuske P., Tatomir A., Wolff M., Helmig R. DuMux: DUNE for Multi-Phase, Component, Scale Physics, Flow and Transport in Porous Media. *Advances in Water Resources*, 2011, vol. 34 (9), pp. 1102-1112. DOI: 10.1016/j.advwatres.2011.03.007
- Ebigbo A., Phillips A., Gerlach R., Helmig R., Cunningham A. B., Class H., Spangler L.H. Darcy-scale modeling of microbially induced carbonate mineral precipitation in sand columns. *Water Resources Research*, 2012, vol. 48(7). DOI: 10.1029/2011WR011714

Received: 16 October 2014