

УДК 622.33: 550.37

А. В. Покатилов, С. М. Простов

## КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ВЛАГОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Электрофизический контроль основан на взаимосвязи электромагнитных свойств горных пород с их пористостью, влагонасыщенностью и изменением агрегатного состояния жидкости, заполняющей поры.<sup>1</sup> Аналитические и лабораторные экспериментальные исследования, изложенные в работах [1, 2], позволили установить следующее:

- основной электрофизический параметр глинистых горных пород, удельное электросопротивление (УЭС), весьма чувствителен к изменениям пористости и влажности; в частности, при коэффициенте пористости в диапазоне  $\kappa_n = 0,04\text{--}0,4$  изменение коэффициента влагонасыщения пор в диапазоне  $\kappa_b = 0,1\text{--}1$  приводит к уменьшению УЭС на 1–3 порядка;

- укрепляющие химические растворы  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и др. в диапазоне рабочих плотностей имеют УЭС  $\rho < 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , что в 2–3 раза ниже, чем УЭС природных жидкостей (грунтовых вод) и обеспечивает электрическую контрастность среды при замещении естественной порононасыщающей жидкости на укрепляющую;

- при переходе укрепляющей смеси в порах породы в гелеобразное, а затем в твердое состояние и наборе прочности укрепленным грунтом УЭС возрастает в 4–200 раз, причем изменение УЭС породы на стадии твердения нелинейно связано с изменением прочностных параметров (сцепления, коэффициента внутреннего трения, прочности при сжатии).

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту №05-05-64100

Технологические процессы электрохимического закрепления (ЭХЗ) глинистых грунтов характеризуются ярко выраженной неоднородностью свойств массива и нестационарностью. Электрофизический метод позволяет контролировать свойства массива и физические процессы в обрабатываемом массиве практически с любой детальностью в пространстве и во времени. В работе [3] предложено наряду с измерением интегральных показателей массива проводить точечный электрофизический контроль зоны ЭХЗ с помощью системы датчиков. Установлена высокая информативность данной методики как на стадии насыщения грунтов укрепляющими растворами, так и в ходе набора массивом требуемых свойств. В частности, установлено, что в процессе обработки массива формируются три основные, качественно различные по свойствам, зоны: напорно-электрохимического насыщения, электроосмотического осушения, средняя переходная зона. Определены закономерности изменения размеров этих зон по основной оси двухэлектродной установки ЭХЗ и в радиальных направлениях от электродов-инъекторов [4]. В лабораторных условиях показано, что на основе комплексных инженерных испытаний грунтов по данным предварительного электрофизического контроля возможно построение тарировочных зависимостей, обеспечивающих контроль оптимальных режимов расхода материалов, электроэнергии и трудозатрат при требуемом диапазоне изменения механических свойств массива [5].

Условия лабораторного

эксперимента даже при сохранении всех технических параметров ЭХЗ (размеры установки, состав растворов, токовый режим) отличаются от натурных следующими обстоятельствами:

- ограниченностью размеров обрабатываемого участка;
- применением только одной пары электродов-инъекторов;
- невозможностью воспроизведения естественного водо- и газодинамического режима массива.

В [6] описана установка для опытно-производственных испытаний технологии контролируемого ЭХЗ грунтов и результаты комплексного экспериментального исследования протекающих при этом процессов. Одной из наиболее существенных составных частей этого исследования были электрофизические, основные результаты которых приведены ниже.

Для электрофизических исследований использовали схемы зондирования с земной поверхности, а также измерения с

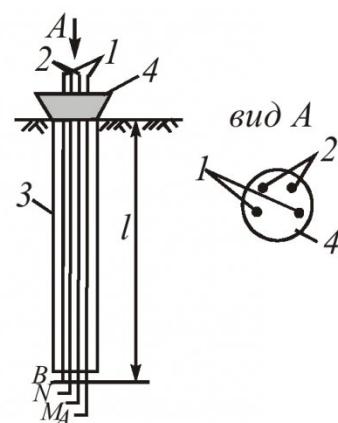


Рис. 1. Конструкция четырехэлектродного датчика-зонда ( $AM = MN = NB = 1 \text{ см}$ ):

1 – питающие электроды  $AB$ ;  
2 – измерительные электроды  $MN$ ;  
3 – изолирующая оболочка;  
4 – фиксирующая пластина

помощью заглубленных микрорадиаторов, устанавливаемых в глубине массива путем механического внедрения. Для реализации 4-электродного метода зондирования с поверхности земли в грунт забивали металлические электроды, изготовленные из прутка твердой стали длиной 0,6–0,9 м, диаметром 14–18 мм, заостренные с одной стороны. Метод заглубленных микрорадиаторов реализуется при помощи датчиков-зондов (рис. 1), которые выполнены из четырехжильного медного кабеля. Глубину установки 1 датчиков-зондов принимали равной половине глубины погружения электрода-инъектора. Общее количество датчиков-зондов составляло 4–12 шт. на один электрод-инъектор, схема их размещения радиальная.

Базовым измерительным прибором электрофизического метода является каротажный прибор КП-2, реализующий измерения на постоянном токе в импульсном режиме с автоматической компенсацией поляризации, разработанный в КузГТУ. Основные функции измерительного прибора следующие: подача напряжения на питущие электроды  $AB$ ; измерение тока  $I_{AB}$ ; измерение падения напряжения  $\Delta U_{MN}$  на приемных электродах  $MN$ ; обеспечение при измерении автоматической компенсации разности потенциалов поляризации этих электродов.

После измерения падения напряжения на приемных электродах  $\Delta U_{MN}$  и зондирующего тока  $I_{AB}$  рассчитывали эффективное УЭС грунта [2]:

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}},$$

где  $K$  – геометрический коэффициент установки, для датчика-зонда при  $AM = MN = NB = aK = 4\pi a$ , при вертикальном зондировании

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM}}.$$

#### Основные технические характеристики прибора КП-2

– значения стабилизированных токов $I_{AB}$ , мА.....	0,01; 0,1; 1; 10
– диапазон измеряемых падений напряжений $\Delta U_{MN}$ , мВ	0,05–5000
– входное сопротивление на клеммах $MN$ , МОм.....	10
– ослабление помехи промышленной частоты, дБ.....	60

По результатам контроля строили графики изменения УЭС вдоль основного направления ЭХЗ от расстояния (координаты  $x$ ) и круговые диаграммы изменения УЭС при фиксированных радиальных расстояниях в четырех перпендикулярных направлениях.

Схема расположения датчиков-зондов и электродов в обрабатываемом массиве приведена на рис. 2. Порядок обработки массива и проведения измерительных работ описаны в работе [6].

На рис. 3 представлены графики относительного изменения УЭС массива вдоль основной оси установки  $x$ , из которых следует, что в зоне электроосмоса на интервале  $x = 53,3 \dots 80$  см происходило наиболее интенсивное падение УЭС за счет процесса накопления влаги у катода. Через 30 ч от момента подачи электрического тока УЭС снизилась на 70 % от начального значения  $\rho_0$ .

В зоне электрохимической обработки на участке  $x = 0 \dots 36$  см УЭС уменьшалось медленнее, чем в зоне электроосмоса. В конце периода обработки вдоль всей основной оси УЭС снижалось. На рис. 3, б, где в начальный период использовалось жидкое стекло плотностью  $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$ , минимальное значение, до которого уменьшилось УЭС, составило  $\rho/\rho_0 = 0,06$ , а на рис. 3, а при  $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3 - \rho/\rho_0 = 0,15$ .

После окончания обработки массива на протяжении всего участка от анода к катоду УЭС увеличилось (рис. 4) (за начальное значение УЭС при построении графиков принимались значения, полученные после обработки). В зоне электроосмоса УЭС выросло в 7 раз по сравнению с начальным значением. Медленнее всего УЭС изменялось в зоне электрохимической

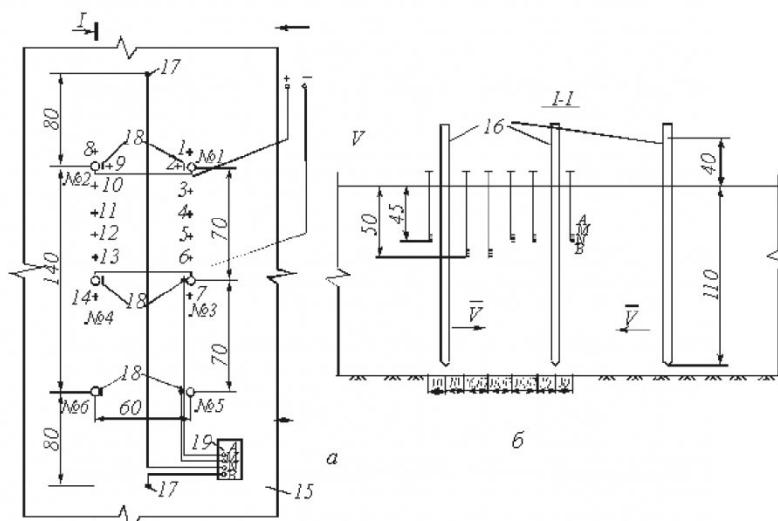


Рис. 2. План и разрез установки, схема размещения датчиков-зондов и электродов для контроля за процессом ЭХЗ электрофизическими методом:

1–14 – датчики-зонды; 15 – обрабатываемый массив; 16 – электроды-инъекторы; 17 – стержневые питущие электроды; 18 – измерительные электроды; 19 – каротажный прибор КП-2; №1–№6 – нумерация электродов-инъекторов;  $\bar{V}$  – направления электроосмотической фильтрации укрепляющего раствора

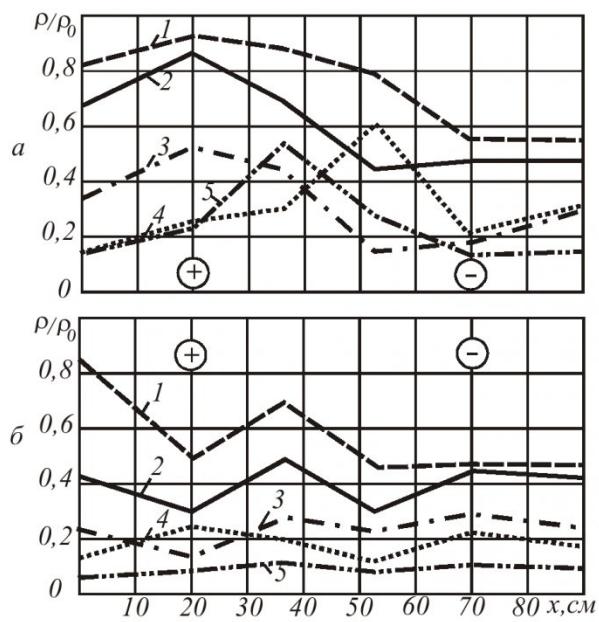


Рис. 3. Изменение относительного УЭС массива вдоль основной оси  $x$  при использовании в начальный период жидкого стекла при  $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$  (а), при  $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$  (б): 1 – через 6 ч; 2 – через 12 ч; 3 – через 30 ч; 4 – через 60 ч; 5 – через 90 ч

обработки, за 14 сут. после ее окончания значение УЭС увеличилось в 3–3,5 раза.

Результаты зондирования с земной поверхности позволили интегрально проконтролировать

процесс закрепления участка массива, расположенного между электродами-инъекторами как

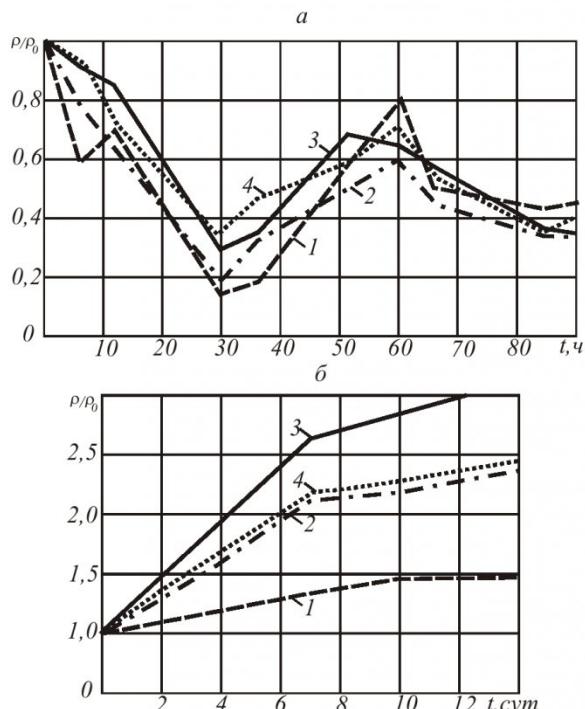


Рис. 5. Изменение эффективного УЭС, измеренного с поверхности массива, при обработке грунта постоянным электрическим током (а) и после окончания обработки грунта (б):  
1 – между электродами № 1–3; 2 – между электродами № 2–4; 3 – между электродами № 3–5;  
4 – между электродами № 4–6

1 – между электродами № 1–3; 2 – между электродами № 2–4; 3 – между электродами № 3–5; 4 – между электродами № 4–6

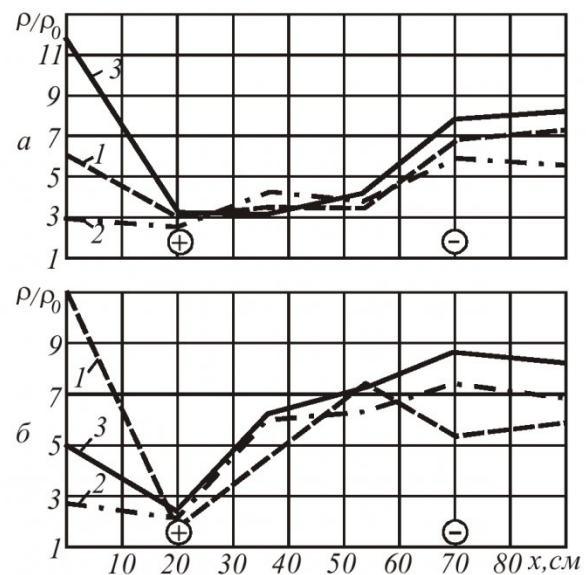


Рис. 4. Изменение относительного УЭС массива в процессе набора прочности при плотности  $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$  (а),  $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$  (б):  
1 – через 7 сут.; 2 – через 10 сут.;  
3 – через 14 сут.

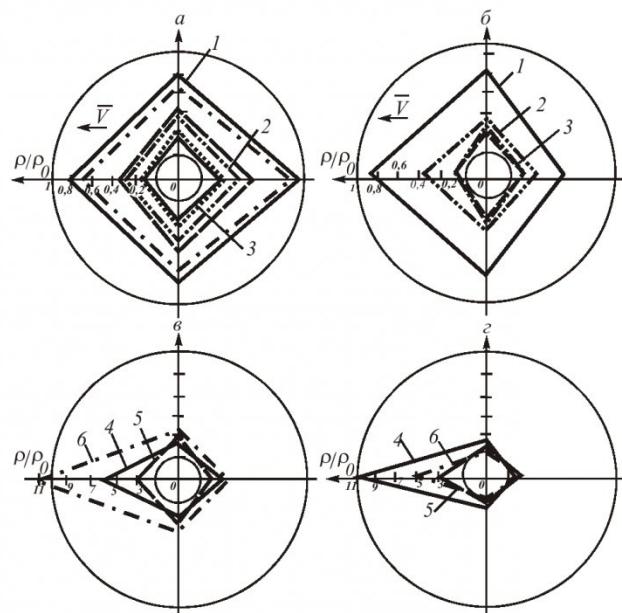


Рис. 6. Круговые диаграммы изменения УЭС грунта в зоне активного электрода-инъектора на расстоянии  $r = 10 \text{ см}$  от его центра на стадии электрохимической обработки при  $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$  (а), при  $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$  (б), на стадии набора прочности при  $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$  (в), при  $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$  (г): 1 – 6 ч с момента начала обработки; 2 – 36 ч; 3 – 90 ч; 4 – 7 сут. с момента окончания обработки; 5 – 10 сут.; 6 – 14 сут.

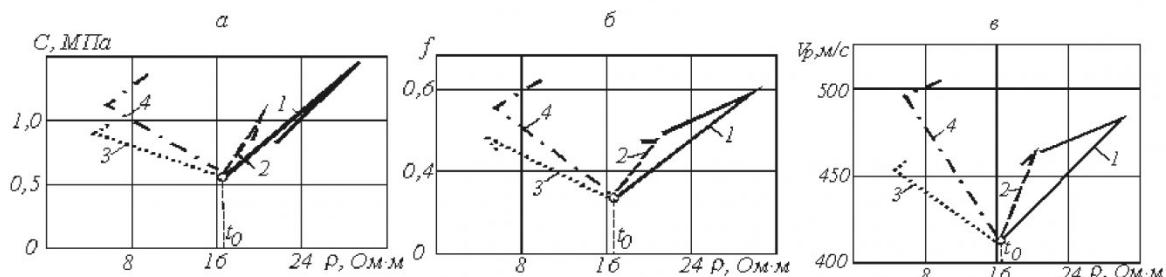


Рис. 7. Взаимосвязи сцепления грунта  $C$  (а), коэффициента внутреннего трения  $f$  (б), скорости распространения ультразвуковых колебаний  $V_p$  (б) с удельным электросопротивлением  $\rho$ :

1 – зона электроосмоса; 2 – средняя зона; 3 – зона электрохимической обработки при  $\gamma = 1,05 \text{ г}/\text{см}^3$ ; 4 – зона электрохимической обработки при  $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$

во время подачи постоянного тока (рис. 5, а), так и во время набора прочности (рис. 5, б).

Из графиков следует, что при ЭХЗ в течение 30 ч после подачи постоянного тока УЭС снизилось на 80 % по сравнению с первоначальным уровнем. Это связано с интенсивным распространением электролита. В последующие 30 ч УЭС увеличивалось за счет того, что жидкое стекло менее интенсивно поступало в грунт, инициировались процессы химического связывания. С началом подачи в электроды-инъекторы хлористого кальция УЭС снова начало снижаться. Это произошло через 60 ч от начала повторной обработки, до конца электрообработки тенденция к снижению УЭС сохранялась. После окончания обработки грунта с момента отключения электросиловой установки УЭС выросло за 14 сут. в 2–2,5 раза.

Для анализа процессов, протекающих вокруг электродов-инъекторов, в которые подавалось жидкое стекло, были построены круговые диаграм-

мы, при этом датчики-зонды располагались на расстоянии 10 см от центра анода вдоль основной оси и в перпендикулярной плоскости. Из построенных круговых диаграмм следует, что УЭС снижается в течение всего процесса закрепления. Более интенсивное снижение УЭС наблюдается на графиках рис. 6, б, где использовалось жидкое стекло плотностью  $\gamma = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Вид круговых диаграмм на рис. 6, в–г свидетельствуют о том, что УЭС уменьшалось в течение 7 сут. после отключения электропитания, но в дальнейшем происходит его рост.

Комплексная обработка данных, полученных в результате проведенного эксперимента, позволили установить зависимости между физическими параметрами массива в основных зонах ЭХЗ (рис. 7).

Применение полученных графиков позволяет, измеряя УЭС массива  $\rho$  в отдельных его точках микродатчиками и на межэлектродных интервалах с земной поверхности, контролировать динамику насыщения

массива укрепляющим раствором и его компонентами, интенсивность набора прочности обработанным массивом.

Наиболее существенным научным результатом проведенных исследований является установление закономерностей изменения физических свойств массива в пространстве и во времени на всех стадиях управления состоянием грунтов. Полученные зависимости позволяют контролировать гидродинамические процессы в зоне электрообработки оперативными геофизическими (акустическими и электрофизическим) методами.

Разработанные методики, измерительная и электросиловая аппаратура имеют широкий диапазон применения. Использование разработок в производственных условиях будет способствовать обеспечению эффективных режимов воздействия на массив, экономии материальных и трудовых затрат, достижению требуемого качества укрепительных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Простов, С. М. Электрофизические свойства глинистых горных пород при твердении порозаполняющих жидкостей // Вестн. КузГТУ. – 2005. – №6. – С. 15–22.
2. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С. М. Простов, В. А. Хямляйнен, М. В. Гуцал, С. П. Бахаева; РАЕН. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 127 с.
3. Простов, С. М. Исследование параметров грунтов при электроосмотическом и электрохимическом укреплении на экспериментальной модели / С. М. Простов, М. В. Гуцал, А. В. Покатилов // Вестник РАЕН (Зап.-Сиб. отд.). – 2004. – №6. – С. 128–134.
4. Простов, С. М. Исследование геометрических параметров зон электрохимического укрепления глинистых грунтов на физической модели / С. М. Простов, А. В. Покатилов // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Сб. науч. тр. Межд. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2004. – С. 32–36.

5. Покатилов, А. В. Изменение физических свойств влагонасыщенных грунтов при электрохимическом упрочнении / А. В. Покатилов, С. М. Простов, В. А. Хямяляйнен, С. Л. Понасенко // ГИАБ. – 2005. – № 10. – С. 75–78.

6. Покатилов, А. В. Контроль изменения физико-механических и акустических свойств массива глинистых грунтов при электрохимическом закреплении / А. В. Покатилов, С. М. Простов // Вестн. КузГТУ. – 2006. №4. – С.10-15.

□ Авторы статьи:

Покатилов

Андрей Владимирович  
– аспирант каф. теоретической и  
геотехнической механики

Простов

Сергей Михайлович  
– докт. техн. наук, проф. каф. теорети-  
ческой и геотехнической механики

УДК 539.375+622.235

Г.А. Казунина, А.А. Мальшин

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ НАГРУЖЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГОРНЫХ ПОРОД)

В работах [1 – 3] при помощи статистики нормированного размаха Херста для процессов импульсной электромагнитной и световой эмиссии нагруженных горных пород показано, что кинетика накопления импульсов эмиссии, характеризующая накопление микротрецин, является персистентным случайнym процессом (то есть процессом, поддерживающим в будущем тенденцию, наблюдавшуюся в прошлом). Хотя случайные процессы электромагнитной и световой импульсной эмиссии несут информацию о количестве микротрецин, образующихся в нагруженных материалах, в них не содержится информации о пространственном распределении микротрецин и их группировке в кластеры, которая принципиально важна с точки зрения прогнозирования момента макроскопического разрушения. Заметим, что с точки зрения эксперимента, получение информации о пространственном распределении микротрецин в непрозрачных материалах возможно только при помощи рассеяния рентгеновских лучей, что весьма затруднительно реализовать непосредственно в ходе динамического нагружения материала. В настоящее время только методы компьютерного моделирования предоставляют фактически

единственную возможность изучения кинетического процесса накопления элементарных повреждений и эволюции их кластерной структуры как единого процесса пространственно-временной эволюции распределенной динамической системы. Так в работах [4, 5], кинетика накопления элементарных исследовалась при помощи вероятностного клеточного автомата, реализованного на основе описанных в [6] объектных моделей алгоритмов роста кластеров Хаммерсли – Лиса – Александровица и многократной маркировки кластеров Хошене – Копельмана. Полученные в [4, 5] результаты позволили не только сравнить кинетический процесс накопления числа элементарных повреждений с кинетическим процессом изменения числа кластеров для различных сценариев моделирования, но и провести детальное сопоставление поведения статистики нормированного размаха Херста и корреляционных функций для этих случайных процессов. Последнее принципиально важно потому, что зная сравнительное поведение статистических характеристик процессов накопления повреждений и эволюции их кластерной структуры, на основе полученных экспериментальных зависимостей статистики нормированного размаха Херста и корреляционных функций случайного потока импульсов эмиссии (световой или электромагнитной) можно сделать выводы о сценарии эволюции кластерной структуры элементарных повреждений. Целью настоящей работы является сравнение статистических характеристик случайного процесса накопления микротрецин, полученных в экспериментах по измерению электромагнитной эмиссии нагруженных горных пород, с результатами компьютерного моделирования эволюции кластерной структуры элементарных повреждений вероятностным клеточным автоматом [4, 5].

Моделирование эволюции кластерной структуры элементарных повреждений вероятностным клеточным автоматом

Таблица

Параметры моделирования

Сценарий моделирования	$p_{occ}$	$p_{spr}$	$p_{mer}$	$\gamma\sigma_{av}/kT$
<b>Базовый однородный статический</b>	0.005	0.0002	0.0002	0.0001
Однородный статический	0.005	0.2	0.2	0.0001
Внутренний динамический	0.005	0.2	0.2	0.4
Внешний динамический	0.005	0.2	0.2	0.0001