

## **ДВУХМАСШТАБНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПО ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ КЕРНА**

***Татьяна Станиславовна Хачкова***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: KhachkovaTS@ipgg.sbras.ru

***Ярослав Владимирович Базайкин***

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, e-mail: bazaikin@math.nsc.ru

***Дмитрий Романович Колюхин***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

***Виктор Иванович Костин***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: KostinVI@ipgg.sbras.ru

***Вадим Викторович Лисица***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

***Галина Витальевна Решетова***

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: kgv@nmsf.sscs.ru

Оценка упругих свойств образца горной породы по КТ-изображениям керна чрезвычайно чувствительна к разрешению сканов, поскольку при грубом разрешении невозможно точно разделить зерна и оценить их шероховатость, наличие и состав цемента, а размер сканов высокого разрешения часто меньше репрезентативного. В работе представлен двухмасштабный численный метод оценки упругих свойств образца по КТ-сканам и SEM-изображениям фрагментов на основе топологического анализа и геостатистического моделирования.

**Ключевые слова:** цифровые керны, упругие свойства, репрезентативный объем, разрешение изображения, шероховатость зерна, топологический анализ, геостатистическое моделирование.

## NUMERICAL TWO-SCALE METHOD FOR ESTIMATION OF ELASTIC PROPERTIES FROM DIGITAL ROCK IMAGES

*Tatyana S. Khachkova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Unior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: KhachkovaTS@ipgg.sbras.ru

*Yaroslav V. Bazaikin*

Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 4 Koptyug Prospect, D. Sc., Head of the Laboratory, e-mail: bazaikin@math.nsc.ru

*Dmitriy R. Kolyukhin*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: KolyukhinDR@ipgg.sbras.ru

*Viktor I. Kostin*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: KostinVI@ipgg.sbras.ru

*Vadim V. Lisitsa*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, tel. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

*Galina V. Reshetova*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 6 Koptyug Prospect, D. Sc., Senior Researcher, e-mail: kgv@nmsf.sscs.ru

Estimations of the elastic properties of a core sample are sensitive to the CT-scan image resolution. On the one hand, coarse image resolution does not allow separating the grains, estimating their roughness. On the other hand, size of the images with fine resolution is typically below representative volume. We present the two-scale method combining geostatistics and topology for numerical estimation of sample elastic properties from joint use of the CT-scans and SEM-images.

**Key words:** elastic properties, representative volume, CT-scan resolution, grain roughness, digital rock physics, topological analysis, geostatistical modeling.

В последние годы активно развивается вычислительная физика горных пород, именуемая в англоязычной литературе digital rock physics. Цифровые изображения ядра используются наряду с физическими образцами горной породы для изучения и получения более точных и полных знаний об их свойствах. С помощью математических методов и современного программного обеспечения вычисляются такие параметры образца, как пористость, проницаемость, упругие модули, скорости продольных и поперечных волн, геометрические, топологические характеристики порового пространства и т. д. Однако численная оценка указанных параметров зависит от разрешения изображения [1, 2]. Это связано с тем, что понижение разрешения (при увеличении размера вокселя)

приводит к потере детальности изображения: исчезают малые поры, узкие поровые каналы, при этом невозможно точно отделить зерна друг от друга, оценить их шероховатость. А с увеличением разрешения (при более детальной съемке) отображается все меньшая часть образца, которая, начиная с какого-то момента, становится нерепрезентативной. В настоящей работе представлен двухмасштабный численный метод оценки упругих свойств образца горной породы, в котором используются как изображения компьютерной томографии с разрешением, подходящим для численного моделирования, так и изображения фрагментов, полученные с помощью электронного микроскопа, позволяющие оценить статистические характеристики границ между зернами, наличие и состав цемента.

Метод состоит из нескольких этапов (выделены на рис. 1–2 красным цветом). Первый шаг – это выделение в цифровой модели образца (состоящей из двух фаз – скелет и поровое пространство) отдельных зерен и контактных прослоек между ними (рис. 1). Для этого используется метод персистентных гомологий, в котором последовательным процессом эрозии скелета строится его фильтрация множествами экскурсии. При этом зерна отделяются друг от друга как различные компоненты связности множеств экскурсии относительно рассмотренной фильтрации. Динамика отделения зерен друг от друга в процессе эрозии отражается на диаграмме баркода (рис. 1, б), длины отрезков баркода пропорциональны линейным размерам зерен. По результатам анализа диаграммы баркода находятся центры и средние радиусы зерен. Затем используется взвешенная диаграмма Вороного набора найденных центров зерен с весами, равными их радиусам, чтобы разделить скелет на ячейки, содержащие зерна. В результате (рис. 1, в) получается цифровая модель с отдельными зернами и прослойками между ними заданной толщины (как минимум 2 вокселя). Второй этап – использование SEM-изображений фрагментов (рис. 2, а) для оценки кривизны и шероховатости поверхности зерен и их статистических параметров (длина корреляции –  $l$ , стандартное отклонение –  $\sigma$ ). Третий этап – численная оценка эффективных упругих параметров модели, содержащей шероховатую прослойку (рис. 2, б), с параметрами шероховатости, определяемыми статистическими характеристиками, оцененными ранее по SEM-изображениям. После этого оцениваются плотности распределения компонент тензора упругих модулей для эффективной осредненной модели среды, заполняющей пространство между зернами, – эффективный цемент (рис. 2, в). Четвертый этап – применение геостатистического моделирования, чтобы сконструировать модель с разломами, заполненными материалом с должным образом распределенными компонентами упругости. Пятый этап – решение задач статического нагружения образца для оценки его упругих параметров.

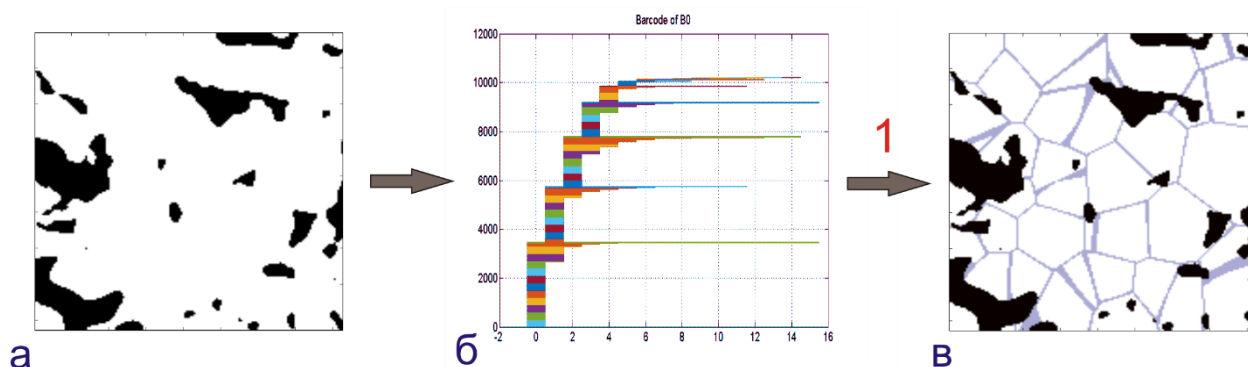


Рис. 1. Выделение отдельных зерен образца горной породы:  
 а) сегментированное КТ-изображение; б) диаграмма баркодов;  
 в) изображение после топологического разделения на зерна

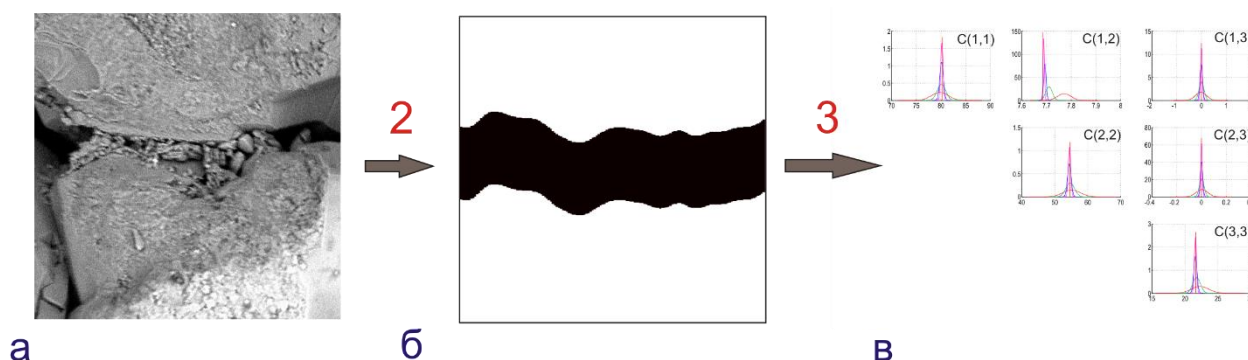


Рис. 2. Численная оценка эффективных упругих параметров модели,  
 содержащей шероховатую прослойку:  
 а) микроскопическое SEM-изображение контакта зерен; б) статисти-  
 ческая модель шероховатого контакта зерен; в) плотность  
 распределения компонент тензора упругости для модели б

При исследовании предложенным методом рассматриваются КТ-сканы образца песчаника с обнажения Берсимер (Австралия) с разрешением 3–5 мкм (рис. 1, а) и микроскопические изображения его фрагментов – контактов зерен (рис. 2, а). В качестве входных параметров для зерен кварца используются значения  $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$ ,  $v_p = 6000 \text{ м/с}$ ,  $v_s = 4075 \text{ м/с}$ . Для глины:  $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$ ,  $v_p = 2770 \text{ м/с}$ ,  $v_s = 1520 \text{ м/с}$ . Для каждой пары  $\langle \sigma, I \rangle$  генерируется по 100 реализаций разломов, полученные тензоры упругости используются как входные параметры для геостатистического моделирования эффективного цемента, заполняющего границы. Проводятся три серии численных экспериментов. Первая – расчет упругих параметров для исходной модели цифрового ядра без топологического разбиения на отдельные зерна (рис. 3, а). Вторая серия – расчет упругих параметров для образца, в котором свойства цемента определяются геостатистически, но он всюду одинаковый (рис. 3, б). Третья серия – геостатистиче-

ское заполнение пространства между зернами – разные реализации цемента для разных границ (рис. 3, в). Для всех трех серий по полученными тензорам жесткости рассчитываются скорости продольных и поперечных волн, оцениваются их средние значения и стандартные отклонения (рис. 3). Видно, что в первом случае скорости завышены, поскольку скелет рассматривается как единое целое и является достаточно жестким. При введении в модель мягкого цемента между зернами скорости снижаются до величин, характерных для песчаников. При этом средние значения скоростей совпадают, а стандартное отклонение в третьей серии экспериментов ниже, что объясняется меньшим отношением характерного размера статистических неоднородностей к размеру модели.

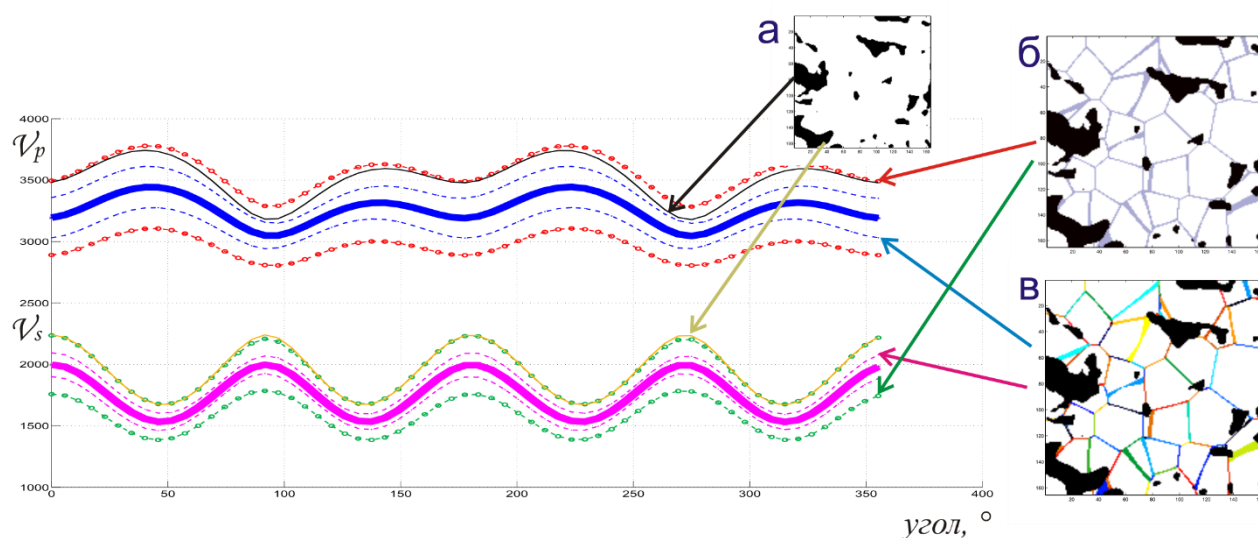


Рис. 3. Скорости продольных и поперечных волн, их средние значения (толстые линии) и стандартные отклонения (пунктирные линии):  
 а) модель без прослоек цемента (скорости сплошными линиями);  
 б) модель с одинаковым цементом во всех прослойках; в) модель с разными реализациями цемента для разных границ

*Работа поддержана грантами РФФИ № 15-55-20004, 16-05-00800, 17-05-00579, 17-05-00250.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние масштаба микротомографических изображений на оценку макромасштабных свойств породы / Я. В. Базайкин [и др.] // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 38–47.
2. Analysis of high-resolution X-ray computed tomography images of Bentheim sandstone under elevated confining pressures / E.H. Saenger [et al.] // Geophysical Prospecting. – 2016. – Vol. 64, Issue 4. – P. 848–859.

© Т. С. Хачкова, Я. В. Базайкин, Д. Р. Колюхин, В. И. Костин,  
 В. В. Лисица, Г. В. Решетова, 2017