

УДК 004.415.25

**П. А. Сантаев, А. А. Власов, М. Ш. Урамаев**

*Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН  
пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия*

*ООО «Энергозапас»  
ул. Арбузова, 4/2б, Новосибирск, 630117, Россия*

*santaevp@gmail.com, vlasovaa@ipgg.sbras.ru, uramaevmsh@gmail.com*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ СКВАЖИННОЙ ЯДЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ**

Представлено высокопроизводительное программное средство для моделирования сигналов плотностного гамма-гамма каротажа в скважине. Полученные расчеты моделирования классического прибора гамма-гамма каротажа плотности в открытом стволе с учетом эксцентриситета верифицированы путем сравнения с результатами моделирования в Geant4.

*Ключевые слова:* статистический метод Монте-Карло, моделирование переноса гамма-квантов, ядерная скважинная геофизика.

### **Введение**

В настоящее время MCNP<sup>1</sup> и Geant4<sup>2</sup> являются популярными универсальными программными средствами для моделирования переноса излучения. Эти пакеты разработаны для наиболее точного моделирования процесса распространения частиц. С помощью этих программ можно получать максимально возможное соответствие с экспериментальными данными, что важно при анализе свойств конструкций новых приборов. Но для геофизических исследований скважин использование MCNP или Geant4 не будет эффективным из-за большого количества накладных вычислений. Цель работы: повышение скорости моделирования сигналов ядерной геофизической аппаратуры путем упрощения геометрической и физической модели.

### **Программное средство Multi-Thread Neutron Gamma**

Было разработано программное средство MTNG (Multi-Threaded Neutron Gamma), способное моделировать прохождение гамма-кванта через вещество с использованием метода Монте-Карло [1; 2]. Программа написана на языке программирования C++. Учитываются

---

<sup>1</sup> A General Monte Carlo N-Particle (MCNP) Transport Code / Los Alamos National Laboratory. URL: <https://mcnp.lanl.gov/> (дата обращения 23.04.2017).

<sup>2</sup> Geant4 Home Page. URL: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/index.shtml> (дата обращения 23.04.2017).

*Сантаев П. А., Власов А. А., Урамаев М. Ш. Разработка программного средства решения прямых задач скважинной ядерной геофизики // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2017. Т. 15, № 2. С. 66–73.*

комптоновское рассеяние и фотоэлектрический эффект. Виртуальный мир (или сцена), в котором моделируется гамма-квант, состоит из составных и / или примитивных (простых) геометрических фигур и источника излучения. В данный момент реализованы следующие геометрические фигуры: цилиндр, сфера, пересечение фигур, объединение фигур, исключение фигур. Каждая геометрическая фигура должна состоять из определенного вещества: например, вода или песок.

Также в программе реализованы вычисление длины свободного пробега гамма-квантов в среде, обработка взаимодействий гамма-квантов со средой, источники излучения. Для расчета длины свободного пробега в среде и розыгрыша типа взаимодействия нужно задать плотность среды и макроскопическое сечение, которые были взяты из базы данных «XCOM: Photon Cross Sections Database»<sup>3</sup> Национального института стандартов и технологий (The National Institute of Standards and Technology). Программа считывает макроскопические сечения для каждого материала из файла, который содержит сечения для взаимодействий: комптоновского рассеяния, фотоэлектрического эффекта, рождения электрон-позитронной пары, рэлеевского рассеяния.

Одним из важных компонентов программы для моделирования переноса излучения является генератор псевдослучайных чисел. Он используется при вычислении длины свободного пробега, в алгоритме Кана, при розыгрыше типа взаимодействия и угла рассеяния. В MTNG используется алгоритм *xorshift* [3], который способен генерировать числа с 0 до  $2^{32}$  (против стандартного с 0 до  $2^{15}$ ) с периодом  $2^{128}$ , что намного больше, чем количество моделируемых траекторий для одного расчета. Также *xorshift* работает намного быстрее, чем стандартный алгоритм за счет использования только побитового сдвига и исключающего «или». Нами было выяснено, что среднее время генерации числа у алгоритма *xorshift* меньше 3,2 раза, чем у стандартного алгоритма (функция *rand* из стандартной библиотеки C++).

При использовании стандартного генератора случайных чисел не удалось получить достаточной точности моделирования (рис. 1), например, при моделировании геофизической аппаратуры, которая описана в разделе «Моделирование классического прибора гамма-гамма каротажа плотности». В результате моделирования ожидалось увидеть монотонно убывающую зависимость отношения показаний детекторов от соотношения воды в скважине. Увеличение количества моделируемых частиц до 10 миллиардов не привело к желаемому результату. Монотонности удалось достичь при использовании алгоритма *xorshift*.

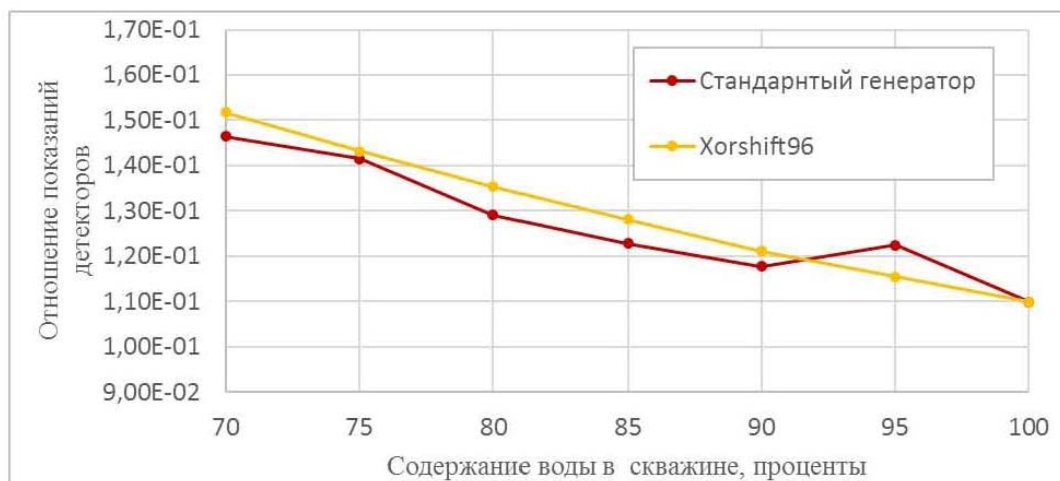


Рис. 1. Результаты моделирования с использованием *xorshift* и стандартного генератора случайных чисел

<sup>3</sup> XCOM: Photon Cross Sections Database // Site of The National Institute of Standards and Technology. URL: <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database> (дата обращения 23.04.2017).

Моделирование одного гамма-кванта производится независимо от других гамма-квантов, поэтому программа легко распараллеливается, а скорость моделирования линейно зависит от количества потоков. Во всех экспериментах, описанных в данной работе, моделирование производилось в MTNG и Geant4 с использованием одного потока.

Для проверки правильности работы созданной программы были проведены эксперименты: моделирование разработанных геометрических фигур и сравнение с Geant4, вычисление пространственного распределения гамма в однородной среде в программных средствах MTNG и Geant4.

### Тестирование геометрических фигур

Были проведены эксперименты, позволяющие проверить правильность работы приложения. Один из них – это вычисление пространственного распределения гамма-квантов в однородной среде.

В этой задаче вычислялось количество пересечений гамма-квантами концентрических сфер, расположенных вокруг точечного изотропного источника, которые испускают гамма-кванты с энергией 662 кэВ. Сферы расположены на расстоянии 1 см друг от друга. В качестве однородной среды были взяты вода ( $H_2O$ ) и песок ( $SiO_2$ ). Был смоделирован 1 миллион траекторий в программах MTNG и Geant4. Полученные результаты представлены на рис. 2.

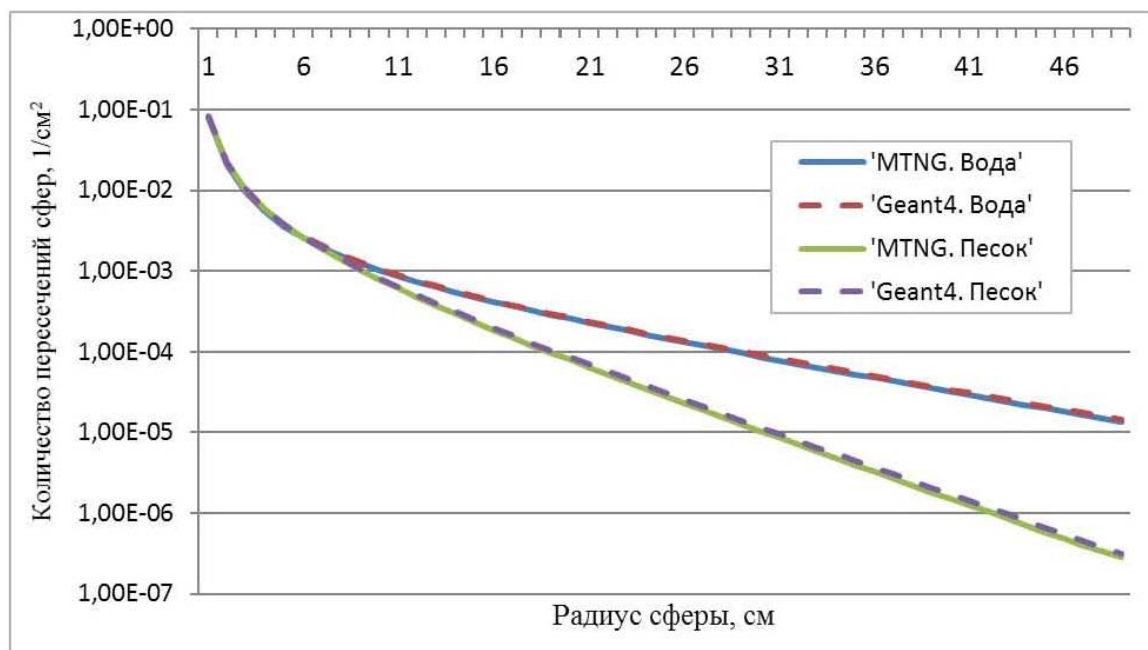


Рис. 2. Пространственное распределение гамма-квантов в воде и в песке

Также было проведено тестирование разработанных геометрических фигур. Тестирование фигур проводилось по одной схеме (рис. 3). Тестируемая фигура расположена в точке (0, 0, 0 см). Фигура состоит из песка ( $SiO_2$ ), а все остальное – из воды ( $H_2O$ ). Мононаправленный источник и сферический детектор с радиусом 5 см расположены в 20 см от тестируемой фигуры. Энергия гамма-квантов, выпускаемых источником, равна 662 кэВ, а количество моделируемых траекторий – 10 миллионов. Источник расположен под углом  $45^\circ$  к вертикали. Положение источника для простоты было выбрано на стенке прибора. Детектор с источником вращаются вокруг фигуры с шагом  $30^\circ$  в трех плоскостях, образованных осями координат.

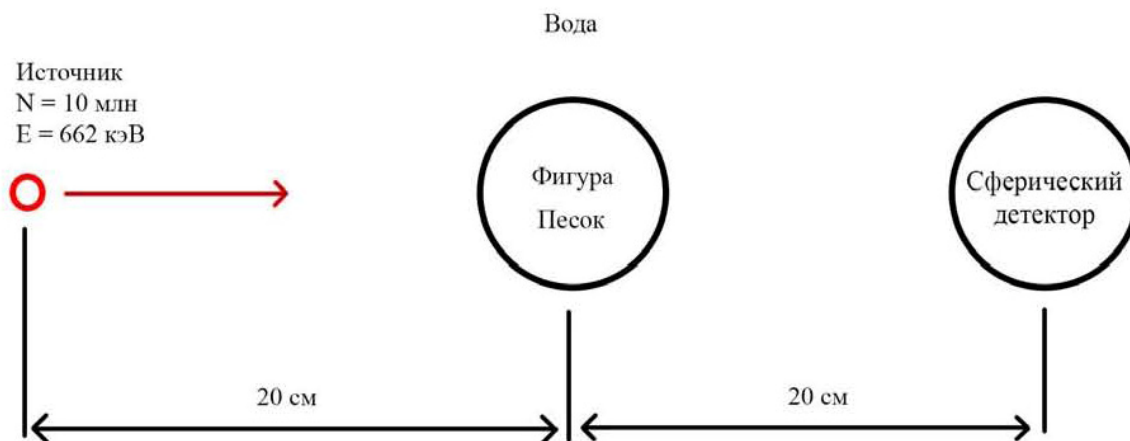


Рис. 3. Схема тестирования геометрических фигур

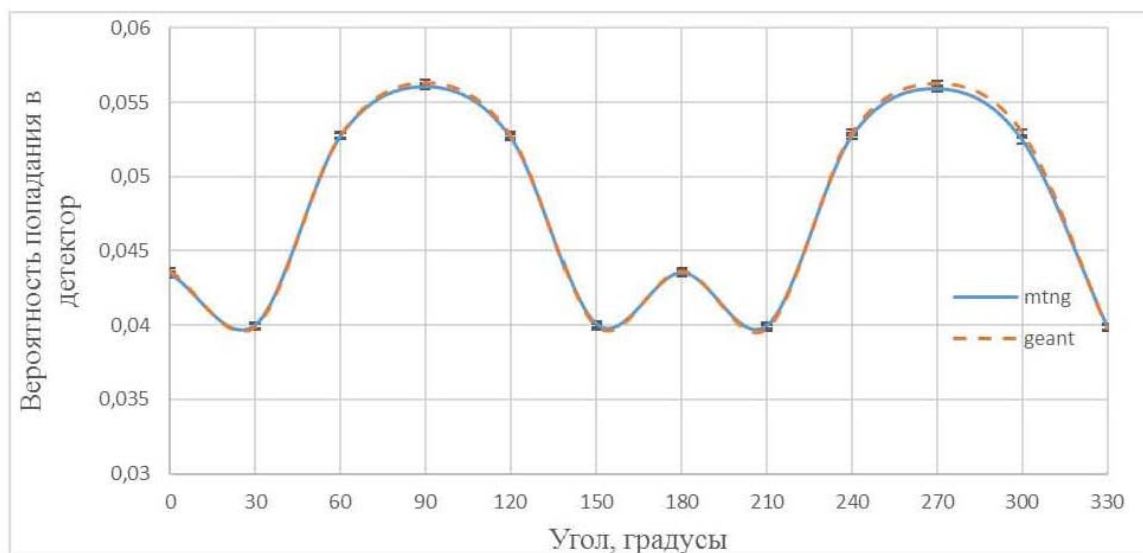


Рис. 4. Результаты тестирования геометрической фигуры цилиндр

На рис. 4. представлены результаты тестирования геометрической фигуры цилиндр по плоскости, образованной осями  $x$  и  $y$ . По такой схеме были протестированы все разработанные геометрические фигуры.

### Моделирование классического прибора гамма-гамма каротажа плотности

Кроме разработки программы было проведено моделирование классического прибора гамма-гамма каротажа плотности (ГГКП) с учетом эксцентриситета. В качестве простейшей геометрии «классического» прибора были взяты два детектора диаметром 2 см, расположенные на расстоянии 20 и 30 см от источника. Детекторы окружены абсолютно поглощающим черным телом и имеют коллимационное окно с углом  $30^\circ$ . Коллимационное окно позволяет увеличить чувствительность детекторов к изменению плотности породы. Пространство между детекторами (а также детектором и источником) заполнено абсолютно поглощающим черным телом (при попадании гамма-кванта в эту область траектория прекращалась, что со-

ответствует конечному поглощению частицы). Источник является мононаправленным и испускает гамма-кванты с энергией 662 кэВ. На рис. 5. представлена схема детектора в скважине. Во всех экспериментах по моделированию скважина имитировалась водой с плотностью  $1 \text{ г/см}^3$ , минеральный состав пласта определялся различным процентным соотношением  $\text{SiO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  (имитация пористости), материал детекторов – NaI. Также этот эксперимент был вычислен в Geant4 для плотности пласта  $2,65 \text{ г/см}^3$ . Сравнение результатов моделирования с плотностью пласта  $2,65 \text{ г/см}^3$  в MTNG и Geant4 представлено на рис. 6. Данная диаграмма представляет зависимость отношения показаний ближних и дальних детекторов и счета детектора от эксцентриситета.

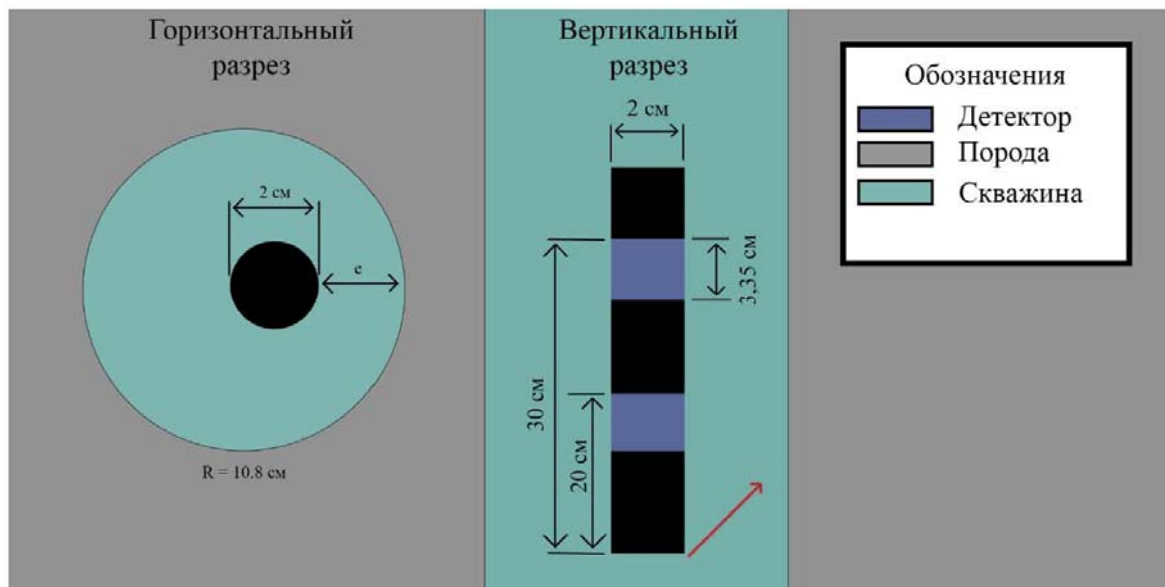


Рис. 5. Схема моделирования классического прибора ГКП

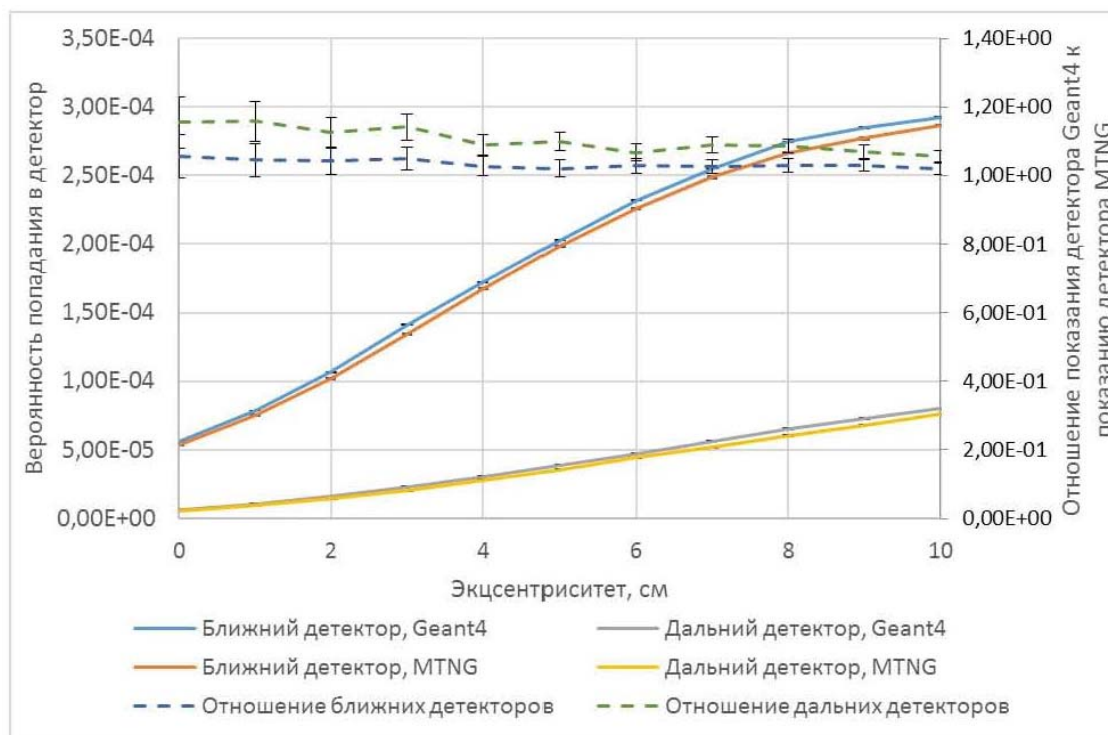


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования ГКП с MTNG и Geant4

Также этот эксперимент моделировали с изменяемым эксцентриситетом и плотностью (состав) пласта. Эксцентриситет варьируется с 0 см до 5 см с шагом 1 см, а состав с 0% воды (остальное песок) до 30% воды с шагом 5%. По результатам моделирования была построена палетка «позвоночник-ребра» [4] – палетка для определения плотности пласта и эксцентриситета (рис. 7). В каждой точке палетки было смоделировано 1 млрд. траекторий. Моделирование прибора ГГКП для построения палетки заняло чуть больше недели.

### Оценка производительности

Было зафиксировано время моделирования геофизической аппаратуры ГГКП, схема которой описана в предыдущем разделе. На рис. 5 представлено среднее время моделирования одной траектории гамма-кванта в программных средствах MTNG и Geant4. Отношение времени моделирования программы Geant4 к времени моделирования MTNG показано по вспомогательной оси. Моделирование проводилось при соотношении воды от 0 до 30 % с шагом 5 % и при постоянном эксцентриситете, равном 0 см. Из графика видно, что отношение не меняется при изменении плотности пласта.

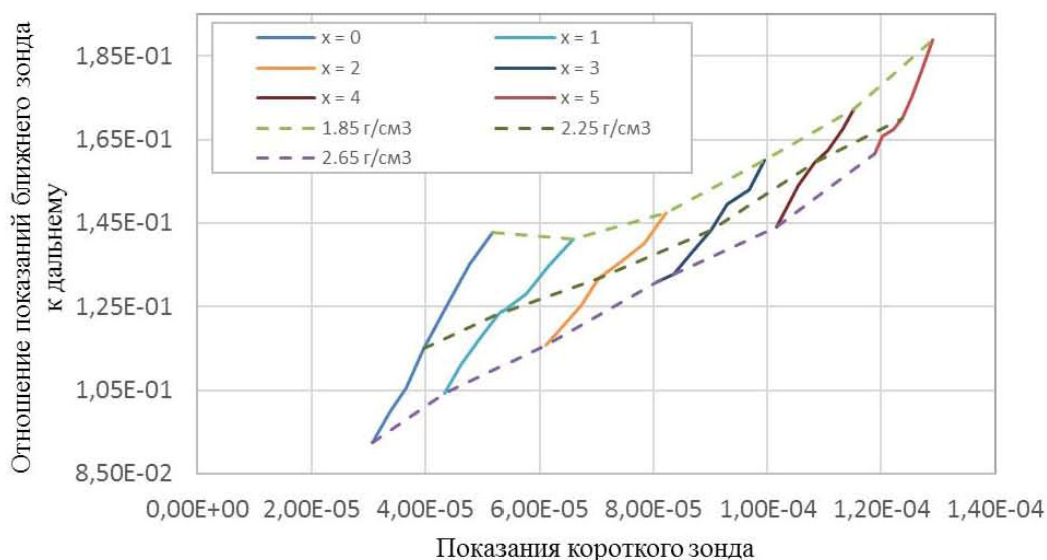


Рис. 7. Палетка «позвоночник – ребра»

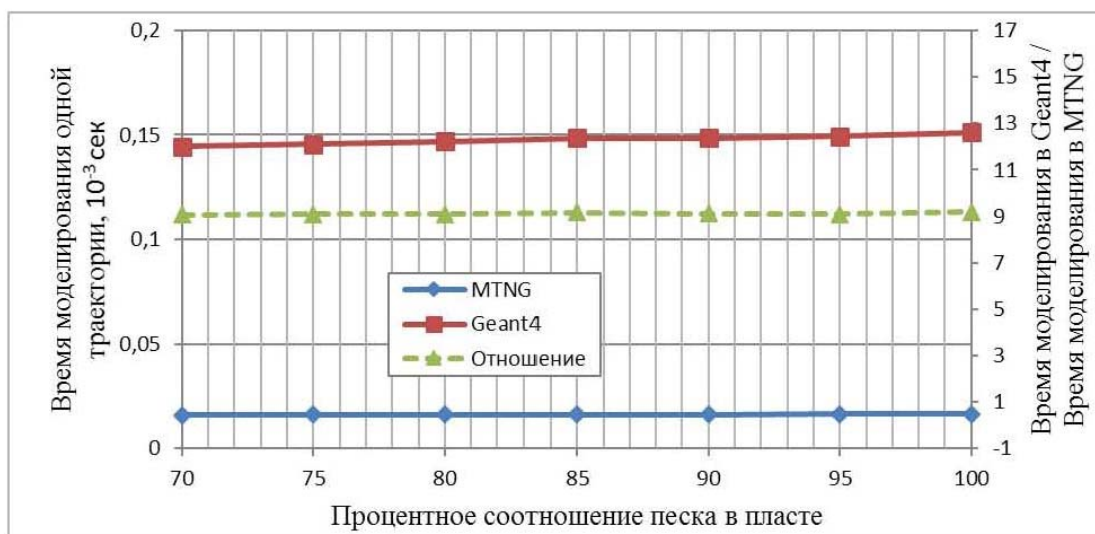


Рис. 8. Время моделирования геофизического прибора ГГКП

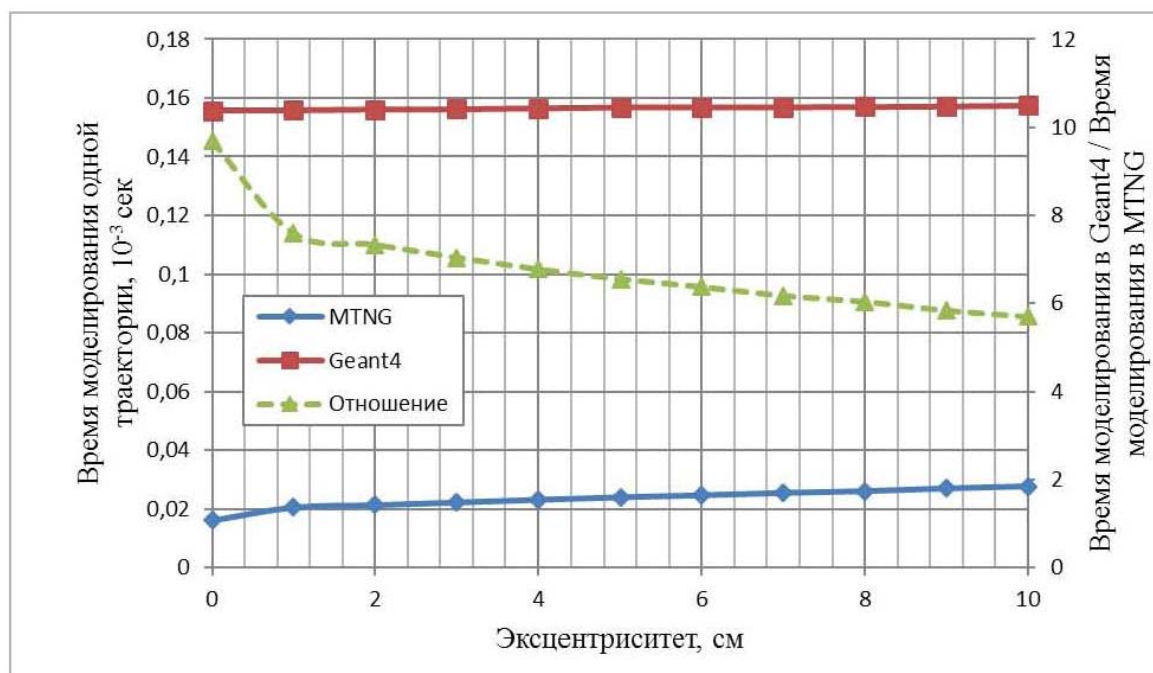


Рис. 9. Время моделирования геофизического прибора ГТКП

На рис. 9 представлено среднее время моделирования при постоянной плотности пласта  $2,65 \text{ г/см}^3$  и при эксцентриситете, варьирующемся от 0 до 10 см с шагом 1 см. Видно, что отношение времени моделирования в Geant4 ко времени моделирования в MTNG меняется в зависимости от эксцентриситета и составляет примерно от 6 до 9 раз. В случае, когда эксцентриситет является постоянным, отношение не зависит от плотности и составляет примерно 9 раз.

Время моделирования в программе MTNG при эксцентриситете 0 см отличается от остальных, где эксцентриситет больше 0 см. Мы объясняем это тем, что геофизическая аппаратура прижата к стенке скважины, и гамма-кванты, испускающиеся источником излучения, попадают сразу в пласт, что упрощает вычисление пересечений траекторий гамма-квантов, так как «сложная» аппаратура находится внутри скважины.

Кроме того, зафиксировано время вычисления пространственного моделирования гамма-квантов в однородной среде. Схема эксперимента была подробно описано выше. По результатам моделирования 10 млн траекторий разработанная программа быстрее примерно в 10 раз, чем Geant4. Средняя скорость моделирования одной траектории в MTNG составляет 38,3 микросекунды. Такая скорость достигается за счет упрощения геометрии и физики модели.

Моделирование всех описанных экспериментов проводилось на компьютере с процессором Intel Xeon X5660 и с 20 Гб оперативной памяти.

### Заключение

В работе представлено программное средство, позволяющее моделировать прохождение гамма-квантов через вещество, учитывает комптоновское рассеяние и фотоэлектрический эффект. Были проведены сравнительные эксперименты в MTNG и Geant4, которые показали хорошую точность моделирования программы MTNG. Созданное программное средство производительнее, чем Geant4, в 6–10 раз. Ускорение было достигнуто за счет упрощения геометрической модели и физической модели: в программе не учитываются рождение элек-

трон-позитронной пары, тормозное излучение и рэлеевское излучение. Время моделирования можно уменьшить за счет переноса вычислений на графические процессоры.

### Список литературы

1. Панин М. П. Моделирование переноса излучения. М., 2008. 212 с.
2. Войтишек А. В. Основы метода Монте-Карло / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2010. 108 с.
3. Marsaglia G. Xorshift RNGs // Journal of Statistical Software. 2003. Vol. 8, № 14. URL: <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v008i14/xorshift.pdf>
4. Алексеев Ф. А., Головская И. В., Гулин Ю. А. и др. Ядерная геофизика при исследовании нефтяных месторождений. М.: Недра, 1978. 358 с.

Материал поступил в редколлегию 20.05.2017

**P. A. Santaev, A. A. Vlasov, M. Sh. Uramaev**

*Novosibirsk State University  
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS  
1 Acad. Koptuyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Energozapas LLC  
4/26 Arbuzov Str., Novosibirsk, 630117, Russian Federation*

*santaevp@gmail.com, vlasovaa@ipgg.sbras.ru, uramaevmsh@gmail.com*

### DEVELOPMENT OF SOFTWARE TOOLS FOR SOLVING PROBLEMS OF NUCLEAR BOREHOLE GEOPHYSICS

This paper presents the high performance software tool for simulation of signal of gamma-gamma density logging device in a borehole. The simulation of classical gamma-gamma density logging device in borehole, taking into account the eccentricity verified by comparing with the simulation results of Geant4.

*Keywords:* Monte-Carlo statistic method, simulation of passage of gamma-rays, nuclear borehole geophysics.

### References

1. Panin M. P. Modelirovanie perenosa izlucheniya. [Simulation of radiation transfer]. Moscow, MEPhI, 2008, 212 p. (In Russ.)
2. Vojtishkek A. V. Osnovy metoda Monte-Karlo. [Basics of the Monte Carlo method]. Novosibirsk State University, 2010, 108 p. (In Russ.)
3. Marsaglia G. Xorshift RNGs. Journal of Statistical Software. 2003. Vol. 8 no. 14. URL: <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v008i14/xorshift.pdf>
4. Alekseev F. A., Golovskaja I. V., Gulin Ju. A. Jadernaja geofizika pri issledovanii nefjtjanyh mestorozhdenij. [Nuclear geophysics in the exploration of oil fields]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 358 p. (In Russ.)