

# Численное исследование волновых полей, генерируемых сейсмоисточником “Енисей”, в блочно-слоистых средах

О. В. Садовская, В. М. Садовский



*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск  
Отдел вычислительной механики деформируемых сред*

[o\\_sadov@icm.krasn.ru](mailto:o_sadov@icm.krasn.ru), [sadov@icm.krasn.ru](mailto:sadov@icm.krasn.ru)

XXII Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева

**“РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ”**

(Красноярск, 12 – 16 ноября 2018 г.)



Секция: **Механика сплошных сред**



- 1 Введение
  - Импульсный электромагнитный источник “Енисей”
  - Мотивация
- 2 Математические модели
- 3 Параллельные вычислительные алгоритмы
  - Метод сквозного счета
  - Комплексы параллельных программ
- 4 Постановка задачи
  - Вычислительная область
  - Модель нагружения
  - Механические параметры слоев
- 5 Результаты расчетов
  - Поверхности уровня напряжений
  - Сейсмограммы
  - Фурье–анализ сейсмограмм
- 6 Заключение



# Введение



Северные территории Восточной Сибири характеризуются таежной вечно-мерзлотной структурой поверхностного слоя почвы, что снижает эффективность геологической разведки с использованием сейсмических источников взрывного и вибрационного типов.

Поэтому компания "ГЕОТЕК Холдинг" разработала специальный экологически чистый импульсный источник сейсмических колебаний "Енисей", акустические волны от которого являются предметом анализа с использованием высокопроизводительных вычислений в этой презентации.



*Сейсмоисточники серии "Енисей":*

<http://gseis.ru/our-business/field-seismic-works/impulse-technique/>





# Введение

Источник сейсмических возмущений “Енисей” представляет собой невзрывной поверхностный импульсный сейсмоисточник с силовым электромагнитным приводом, который содержит один, два или четыре синхронно работающих короткоходовых электромагнита с автономной системой питания от емкостного накопителя электрической энергии и устройства для заряда и разряда [1–3].

Источник существует в колесном, санном, мобильном и водном вариантах.

“Енисей” вполне конкурентоспособен с источниками взрывного и вибрационного типа по эффективности и качеству производства разведочных работ и имеет неоспоримые преимущества в экономическом и экологическом аспектах.



[1] Смирнов В.П. Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда “Енисей СЭМ, КЭМ” // *Приборы и системы разведочной геофизики*. 2003. Т. 3, № 1. С. 21–25.



[2] Детков В.А., Щадин П.Ю., Ивашин В.В. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники “Енисей”: особенности технического решения и применения // *Приборы и системы разведочной геофизики*. 2007. Т. 22, № 4. С. 30–33.



[3] Детков В.А. Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками // *Журнал СФУ: Сер. Математика и физика*. 2009. Т. 2, № 3. С. 298–304.

# Введение



Применение этого источника оказывается несравнимо более дешевым, и он является едва ли не единственным возможным средством при проведении работ вблизи зданий и сооружений, в водоохранных зонах и на площадях, где имеется большое количество рек и озер.

Используется также по ледовым покрытиям водоемов, на мелководье и на шельфах.

В процессе создания, доработки и совершенствования эксплуатационных и технических характеристик электромагнитный импульсный источник “Енисей” был подвергнут тщательному экспериментальному анализу и тестированию [4, 5].



[4] Смирнов В.П. Технические средства и содержание проверки источников ряда “Енисей” в цикле накопления одиночных и групповых воздействий // *Приборы и системы разведочной геофизики*. 2005. Т. 12, № 2. С. 45–48.



[5] Щадин П.Ю. Характеристики волнового сейсмического поля, возбуждаемого импульсными источниками “Енисей” // *Технологии сейсморазведки*. 2013. Т. 10, № 4. С. 74–80.





# Математические модели

В настоящей работе представлена вычислительная технология, конечной целью которой является детальное математическое моделирование волновых полей, возбуждаемых источником “Енисей”, в блочно-слоистых геосредах с различными механическими характеристиками блоков (глинистых и мерзлых грунтах, сыпучих, пористых и флюидонасыщенных средах).

Результаты моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений будут использоваться для оптимизации режимов функционирования источника при проведении сейсмических исследований.

Для численного моделирования процессов распространения волн напряжений и деформаций в реологически сложных средах нами разработаны вычислительные алгоритмы и программные комплексы, ориентированные на многопроцессорные вычислительные системы кластерной архитектуры [6–15].

Применяются математические модели упругопластических, сыпучих и пористых сред с учетом разного сопротивления материалов растяжению и сжатию [6–10, 14], модели многоблочных сред с вязкоупругими, упругопластическими и флюидонасыщенными пористыми прослойками [12, 13, 15].

Используются также уравнения динамики моментного континуума Коссера, описывающие волновые движения структурно-неоднородных сред, в которых наряду с поступательными степенями свободы реализуются независимые вращения материальных частиц [7, 11, 12].



# Наши публикации



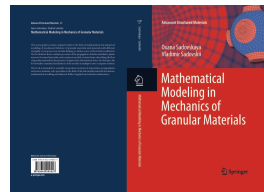
[6] Садовская О.В., Садовский В.М. Параллельная реализация алгоритма для расчета упругопластических волн в сыпучей среде // *Вычислительные методы и программирование*. 2005. Т. 6, № 2. С. 86–93.



[7] Sadovskaya O., Sadovskii V. *Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials*. Ser.: *Advanced Structured Materials*, Vol. 21. Springer, Heidelberg – New York – Dordrecht – London, 2012. 390 p.  
DOI: 10.1007/978-3-642-29053-4

<http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-29053-4>

10129 загрузок



[8] Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. Parallel program systems for modeling elastic-plastic waves in structurally inhomogeneous materials // *AIP Conference Proceedings*. 2012. V. 1479. P. 1611–1614. DOI: 10.1063/1.4756474  
[http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1479/1/1611\\_1](http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1479/1/1611_1)



[9] Sadovskaya O.V., Sadovskii V.M. Numerical implementation of mathematical model of the dynamics of a porous medium on supercomputers of cluster architecture // *AIP Conference Proceedings*. 2015. V. 1684. P. 070005-1–070005-9.  
<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4934306>








[10] Садовский В.М., Садовская О.В. Анализ деформации пористой среды с учетом схлопывания пор // *ПМТФ*. 2016. Т. 57, № 5. С. 53–65.  
DOI: 10.15372/PMTF20160507



# Наши публикации



-  [11] Sadovskaya O.V., Sadovskii V.M. Analysis of rotational motion of material microstructure particles by equations of the Cosserat elasticity theory // *Acoustical Physics*. 2010. V. 56, No. 6. P. 942–950.  
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063771010060199>
-  [12] Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum // *Wave Motion*. 2015. V. 52. P. 138–150. DOI: 10.1016/j.wavemoti.2014.09.008  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165212514001358>
-  [13] Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V., Lukyanov A.A. Modeling of wave processes in blocky media with porous and fluid-saturated interlayers // *Journal of Computational Physics*. 2017. V. 345. P. 834–855. DOI: 10.1016/j.jcp.2017.06.001  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999117304461>
-  [14] Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. Mathematical and numerical modelling of porous geomaterials based on generalized rheological approach // *Proc. of 9th Australasian Congress on Applied Mechanics 2017 (ACAM 9, Sydney, Australia)*, p. 636–643. Engineers Australia, 2018. 875 p. ISBN: 978-1-5108-5964-7
-  [15] Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. Numerical algorithm based on implicit finite-difference schemes for analysis of dynamic processes in blocky media // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2018. V. 33, Iss. 2. P. 111–121. DOI: 10.1515/rnam-2018-0010





# Уравнения модели в упругих блоках



Предполагается, что структура среды известна и представлена набором из разнородных блоков с криволинейными границами. Каждый блок характеризуется своим однородным материалом с соответствующими определяющими уравнениями.

В простейшем случае упругого блока выполняется система уравнений линейной динамической теории упругости, записанная для вектора скорости  $v$  и тензора напряжений  $\sigma$ :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \rho \left( c_p^2 - 2c_s^2 \right) (\nabla \cdot v) I + \rho c_s^2 (\nabla v + \nabla v^*) \quad (1)$$

- $\rho$  – плотность материала,  $c_p$  и  $c_s$  – скорости продольных и поперечных упругих волн
- $\nabla$  – градиент по пространственным координатам,  $I$  – единичный тензор
- звездочка означает сопряженный тензор  
используются общепринятые обозначения тензорного анализа

Начальные скорости и напряжения считаются равными нулю. На части границы задаются внешние напряжения от сосредоточенного импульсного воздействия. На плоскостях симметрии, если такие имеются, формулируются условия симметрии. Часть границы может быть неотражающей поверхностью, на ней моделируются условия прохождения волн без заметного отражения. На внутренних границах раздела ставятся условия непрерывности векторов скоростей и напряжений на площадках контакта блоков.



# Матричная форма систем уравнений динамической теории упругости и пластичности



Процесс деформирования упругих тел описывается системой уравнений:

$$A \frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{i=1}^n B^i \frac{\partial U}{\partial x_i} + QU + G \quad (2)$$

При учете пластической деформации материала система (2) заменяется вариационным неравенством:

$$(\tilde{U} - U) \left( A \frac{\partial U}{\partial t} - \sum_{i=1}^n B^i \frac{\partial U}{\partial x_i} - QU - G \right) \geq 0, \quad \tilde{U}, U \in F \quad (3)$$

- $F$  – выпуклое и замкнутое множество, определяемое критерием пластичности
- $U(t, x)$  –  $m$ -мерная искомая вектор-функция,  $\tilde{U}$  – варьируемый вектор
- $A$  – симметричная положительно определенная матрица коэффициентов при производных по времени,  $B^i$  – симметричные матрицы коэффициентов при производных по пространственным переменным,  $Q$  – антисимметричная матрица,  $G$  – заданный вектор
- $n$  – пространственная размерность задачи (1, 2 или 3)
- размерность  $m$  системы (2) и конкретный вид матриц-коэффициентов определяется используемой математической моделью



# Матричная форма систем уравнений для задач динамики сыпучих и пористых материалов



В задачах механики сыпучих сред с пластическими свойствами возникает более общее вариационное неравенство:

$$(\tilde{V} - V) \left( A \frac{\partial U}{\partial t} - \sum_{i=1}^n B^i \frac{\partial V}{\partial x_i} - QV - G \right) \geq 0, \quad \tilde{V}, V \in F \quad (4)$$

Вектор-функции  $V$  и  $U$  связаны между собой уравнениями:

$$V = \varsigma U + (1 - \varsigma) U^\pi, \quad U = \frac{1}{\varsigma} V - \frac{1 - \varsigma}{\varsigma} V^\pi \quad (5)$$

Аналогичное неравенство описывает динамическое поведение пористых материалов с учетом увеличения жесткости после схлопывания пор

- $U^\pi$  – проекция вектора-решения на заданный выпуклый конус  $K$ , с помощью которого описывается различное сопротивление материала растяжению и сжатию
- $\varsigma \in (0, 1]$  – параметр регуляризации модели, характеризующий отношение модулей упругости при растяжении и сжатии





# Структура численных алгоритмов

- Явный по времени алгоритм численной реализации вариационного неравенства наиболее общего вида (5) строится с помощью метода расщепления по физическим процессам следующим образом:
  - сначала на каждом временном слое решается упругая задача
  - затем полученное решение корректируется для учета пластических, сыпучих и пористых свойств материала
- Для решения упругой задачи применяется метод двуциклического расщепления по пространственным переменным
- На этапах расщепления в качестве разностной схемы для одномерных гиперболических систем уравнений вида

$$A \frac{\partial U^{(k)}}{\partial t} = B^i \frac{\partial U^{(k)}}{\partial x_i} + G^i \quad (6)$$

$k = \overline{1, 2n}$  – номер этапа расщепления,  $i = \overline{1, n}$  – направление расщепления

используется монотонная конечно-разностная ENO–схема типа “предиктор–корректор” с кусочно-линейными распределениями скоростей и напряжений по ячейкам

- Для учета необратимых пластических деформаций, а также сыпучести и пористости материалов в расчетах используются специальные алгоритмы корректировки напряжений

# Двумерное расщепление для решения упругой задачи



Метод расщепления приводит к серии из 7 одномерных задач, три из которых решаются на временном интервале  $[t_n, t_n + \tau/2]$ , а три последних – на интервале  $[t_n + \tau/2, t_n + \tau]$ , где  $\tau$  – шаг по времени:

$$\begin{aligned}
 A \frac{\partial U^{(1)}}{\partial t} &= B^1 \frac{\partial U^{(1)}}{\partial x_1} + G^1, & U^{(1)}(t_n) &= U(t_n) \\
 A \frac{\partial U^{(2)}}{\partial t} &= B^2 \frac{\partial U^{(2)}}{\partial x_2} + G^2, & U^{(2)}(t_n) &= U^{(1)}(t_n + \tau/2) \\
 A \frac{\partial U^{(3)}}{\partial t} &= B^3 \frac{\partial U^{(3)}}{\partial x_3} + G^3, & U^{(3)}(t_n) &= U^{(2)}(t_n + \tau/2) \\
 A \frac{\partial U^{(4)}}{\partial t} &= Q U^{(4)}, & U^{(4)}(t_n) &= U^{(3)}(t_n + \tau/2) \\
 A \frac{\partial U^{(5)}}{\partial t} &= B^3 \frac{\partial U^{(5)}}{\partial x_3} + G^3, & U^{(5)}(t_n + \tau/2) &= U^{(4)}(t_n + \tau/2) \\
 A \frac{\partial U^{(6)}}{\partial t} &= B^2 \frac{\partial U^{(6)}}{\partial x_2} + G^2, & U^{(6)}(t_n + \tau/2) &= U^{(5)}(t_n + \tau) \\
 A \frac{\partial U^{(7)}}{\partial t} &= B^1 \frac{\partial U^{(7)}}{\partial x_1} + G^1, & U^{(7)}(t_n + \tau/2) &= U^{(6)}(t_n + \tau)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Вектор-функция  $U^{(7)}(t_n + \tau)$  представляет собой искомое решение на временном слое  $t_n + \tau$ .



# Структура параллельной программы

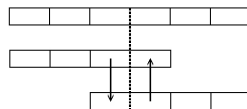
Численные алгоритмы реализованы в виде комплексов параллельных прикладных программ для решения задач динамики структурно неоднородных деформируемых сред (сыпучих и пористых материалов, континуума Коссера и многоблочной среды) на многопроцессорных вычислительных системах с использованием библиотеки MPI по технологии SPMD на языке Fortran.

## 1 Программа–препроцессор

- построение сеток
- равномерное распределение начальных данных между узлами кластера
- упаковка каждым узлом кластера своей части данных в двоичные файлы

## 2 Основная программа

- пошаговый по времени численный счет задачи на каждом узле кластера
- обмен данными между процессорами
- сохранение результатов счета в контрольных точках



*Схема обмена с законтурными ячейками*

## 3 Программа–постпроцессор

- прореживание файлов, содержащих результаты счета в контрольных точках
- графическая обработка результатов

Верификация программных комплексов выполнена на точных решениях – формулах геометрической сейсмоки для годографов отраженных и преломленных волн.

Параллельные программные комплексы зарегистрированы в Роспатенте.





# Авторское программное обеспечение

Комплексы параллельных программ для решения 2-мерных и 3-мерных упругопластических задач динамики сыпучих сред

Комплексы параллельных программ для расчета 2-мерных и 3-мерных динамических задач моментной теории упругости

Программный комплекс для численного моделирования динамических процессов в многоблочных средах на кластерных системах



**Программы:**

*2Dyn\_Granular, 3Dyn\_Granular*

Свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012613989 и № 2012613990 от 28.04.2012 (Роспатент)

**Программы:**

*2Dyn\_Cosserat, 3Dyn\_Cosserat*

Свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012614823 и № 2012614824 от 30.05.2012 (Роспатент)

**Программа**  
*2Dyn\_Blocks\_MPI*

Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016615178 от 17.05.2016 (Роспатент)

Предварительная серия расчетов проводилась с целью валидации программного комплекса *3Dyn\_Granular* по основным параметрам сейсмических волн от источника – частотам и амплитудам колебаний. Сопоставление численных результатов с имеющимися экспериментальными данными показало удовлетворительное количественное соответствие.

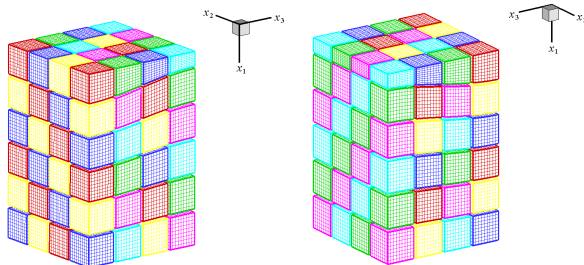


## Распределение вычислительной нагрузки между узлами кластера



Рассмотрим 2–слойный массив упругой среды размером  $60 \text{ м} \times 40 \text{ м} \times 40 \text{ м}$ . Верхний 10–метровый слой является более податливым и, наоборот, более жестким по сравнению с нижним 50–метровым основным слоем.

Расчетная область равномерно распределена между 96 процессорами: 16 в верхнем слое и 80 – в нижнем. Каждый процессор кластера производит вычисления в параллельном режиме. Разностная сетка в верхнем слое массива –  $50 \times 200 \times 200$  ячеек, а в нижнем слое –  $250 \times 200 \times 200$  ячеек, то есть каждым узлом кластера выполняются расчеты на сетке из  $50 \times 50 \times 50$  ячеек. Для наглядности разностная сетка на рисунках прорежена в 5 раз в каждом направлении.



*Двухслойная расчетная область (виды с разных сторон):  
Равномерное распределение вычислительной нагрузки между 96 узлами кластера*



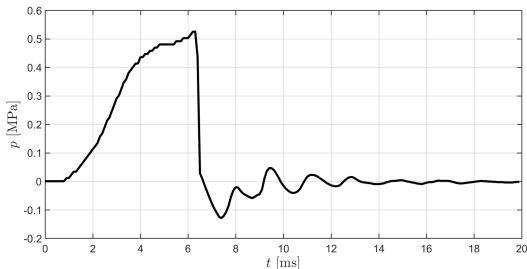


# Ударное воздействие от источника “Енисей”



На верхней границе расчетной области задавалось локализованное воздействие от колесного источника с четырьмя электромагнитами. С учетом симметрии расчеты проводились для четверти массива, ограниченной вертикальными координатными плоскостями. На левой и правой границах области решения ставились условия симметрии. Тылные границы и нижнее основание рассматривались как неотражающие поверхности. На этапе решения 1-мерных систем метода расщепления на этих поверхностях полагались нулевыми граничные значения инвариантов Римана, соответствующих уходящим характеристикам, что эквивалентно отсутствию отраженных волн в 1-мерных задачах.

Зона нагружения – круг площадью  $1 \text{ м}^2$ , расположенный на удалении 2.5 м и 1.25 м от левой и правой границ симметрии.



Давление в таком виде задавалось на основе экспериментальных измерений ускорения реактивной массы электромагнита.

*Зависимость от времени давления от источника в зоне локализации*





## Параметры упругости материалов

Вычисления проводились для 2–слойной и 3–слойной среды. В первом случае верхний 10-метровый слой является более податливым (глина) и, наоборот, более жестким (твердый грунт) по сравнению с нижним 50-метровым основным слоем (грунт). Аналогичная задача решалась для случая, когда верхний слой – вода, а также для 3–слойной среды, верхний слой которой – лед, средний слой – вода, нижний толстый слой – грунт (с параметрами из таблицы). Толщина ледового покрова в расчетах – 3.5 м, что характерно для арктического шельфа.

Для демонстрации возможностей программы граница раздела между слоями грунта с различными свойствами (или между водой и грунтом) была искривлена.

В случае 3–слойной среды расчетная область распределялась равномерно между 16 процессорами в верхнем слое (лед), 16 процессорами в среднем слое (вода) и 64 процессорами в нижнем слое (грунт).

Плотности и скорости упругих волн в слоях из разных материалов приведены в таблице.

*Механические параметры материалов*

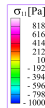
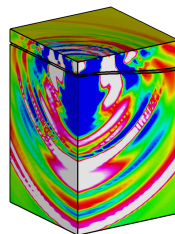
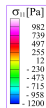
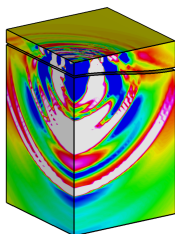
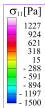
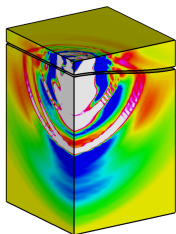
	$\rho$ [кг/м <sup>3</sup> ]	$c_p$ [м/с]	$c_s$ [м/с]
лед	900	3000	1800
вода	1000	1450	0
глина	2100	1800	1100
грунт	2400	4500	2700
твердый грунт	2600	6000	3500



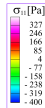
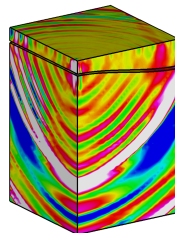
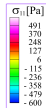
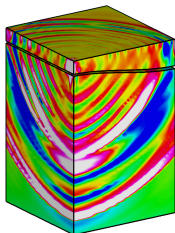
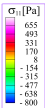
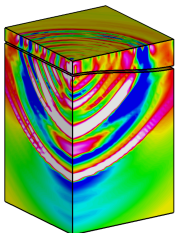
# Результаты для податливого и твердого поверхностных слоев



Верхний слой – глина, нижний слой – грунт



Поверхности уровня нормального напряжения  $\sigma_{11}$  в вертикальном направлении:  $t = 15, 18$  и  $21$  мс

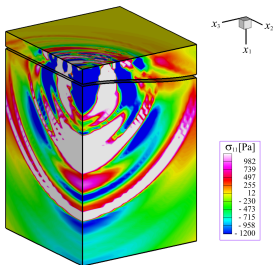


Верхний слой – твердый грунт, нижний слой – грунт

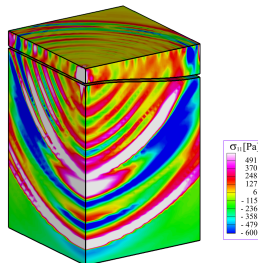


# 4 типа верхних слоев: глина, твердый грунт, вода и лед

Верхний слой – глина,  
нижний слой – грунт

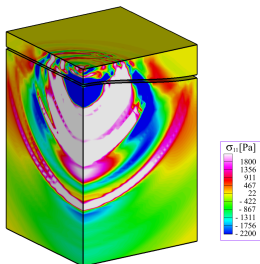


Верхний слой – твердый  
грунт,  
нижний слой – грунт

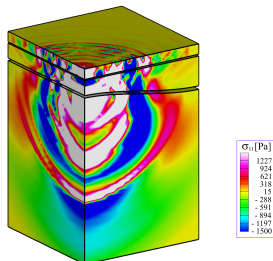


Поверхности уровня нормального напряжения  $\sigma_{11}$   
в вертикальном направлении:  $t = 18$  мс

Верхний слой – вода,  
нижний слой – грунт

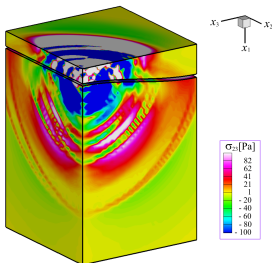


Верхний слой – лед,  
средний слой – вода,  
нижний слой – грунт

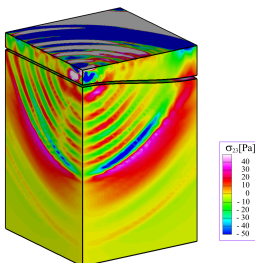


# 4 типа верхних слоев: глина, твердый грунт, вода и лед

Верхний слой  
– глина,  
нижний слой  
– грунт

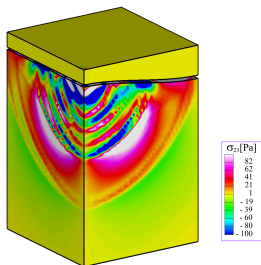


Верхний слой  
– твердый  
грунт,  
нижний слой  
– грунт

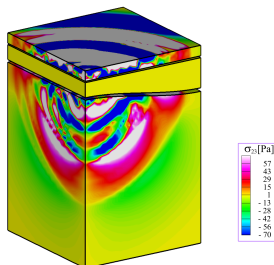


Поверхности уровня касательного напряжения  $\sigma_{23}$   
в горизонтальном направлении:  $t = 18$  мс

Верхний слой  
– вода,  
нижний слой  
– грунт

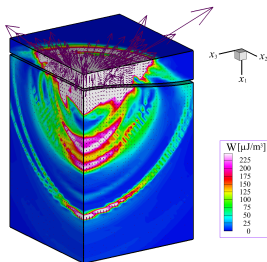


Верхний слой  
– лед,  
средний слой  
– вода,  
нижний слой  
– грунт

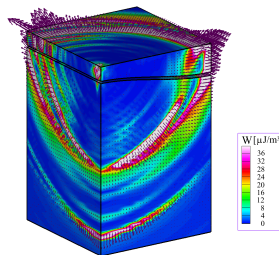


# 4 типа верхних слоев: глина, твердый грунт, вода и лед

Верхний слой  
– глина,  
нижний слой  
– грунт

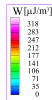
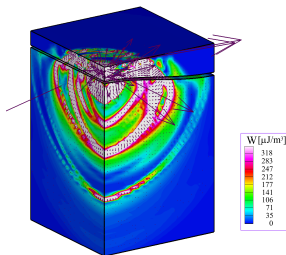


Верхний слой  
– твердый  
грунт,  
нижний слой  
– грунт

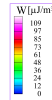
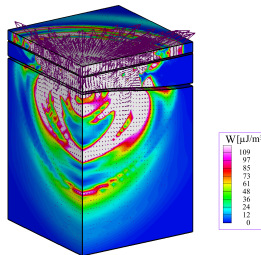


Поверхности уровня энергии  $W$  и векторное поле Умова–Пойнтинга:  
 $t = 18 \text{ мс}$

Верхний слой  
– вода,  
нижний слой  
– грунт



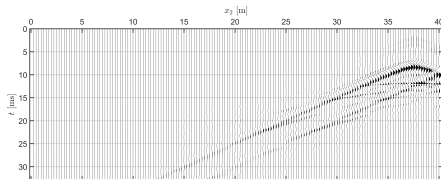
Верхний слой  
– лед,  
средний слой  
– вода,  
нижний слой  
– грунт



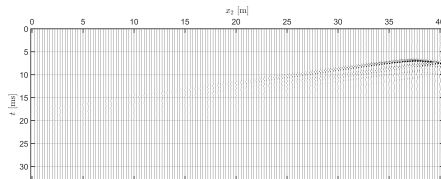


# Сейсмограммы упругих волн

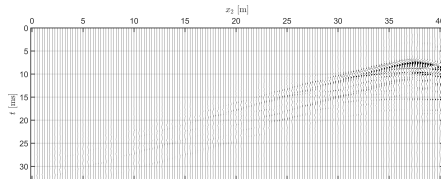
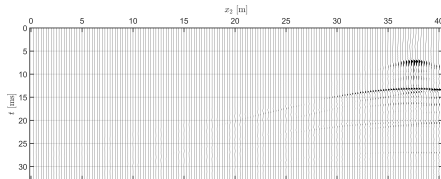
Верхний слой – глина



Верхний слой – твердый грунт



Сейсмограммы ускорения  $a_1$  в направлении  $x_1$



Верхний слой – вода

Верхний слой – лед, средний слой – вода

Нижний слой – грунт

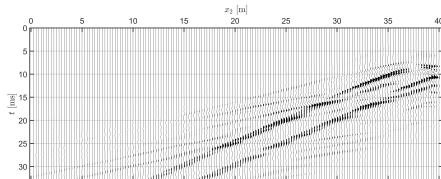
Приемники расположены вдоль оси  $x_2$  на плоскости симметрии



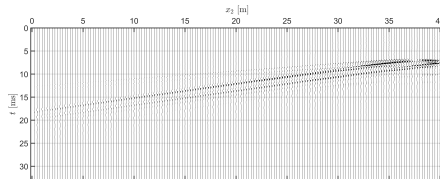


# Сейсмограммы упругих волн

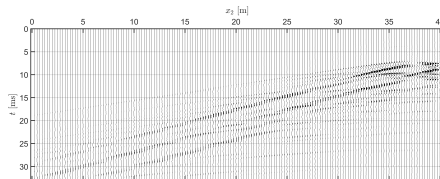
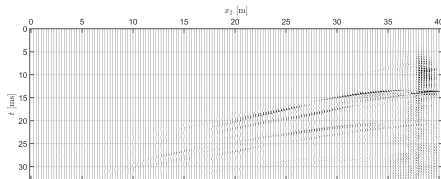
Верхний слой – глина



Верхний слой – твердый грунт



Сейсмограммы ускорения  $a_2$  в направлении  $x_2$



Верхний слой – вода

Верхний слой – лед, средний слой – вода

Нижний слой – грунт

Приемники расположены вдоль оси  $x_2$ ,  
на расстоянии 3.75 м от плоскости симметрии

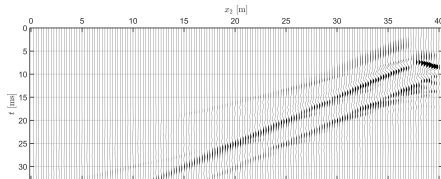




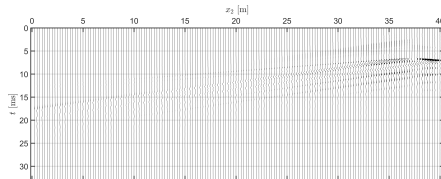


# Сейсмограммы упругих волн

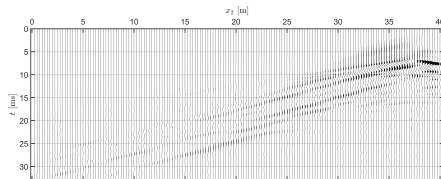
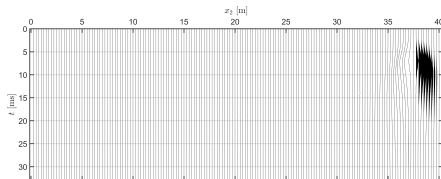
Верхний слой – глина



Верхний слой – твердый грунт



Сейсмограммы скорости  $v_2$  в направлении  $x_2$



Верхний слой – вода

Верхний слой – лед, средний слой – вода

Нижний слой – грунт

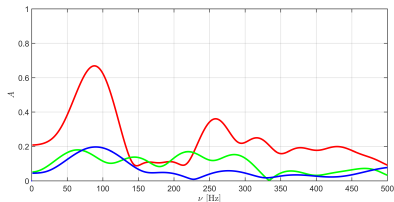
Приемники расположены вдоль оси  $x_2$ ,  
на расстоянии 3.75 м от плоскости симметрии



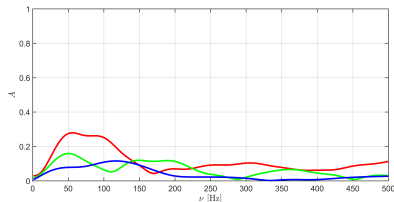


# Амплитудно-частотные характеристики

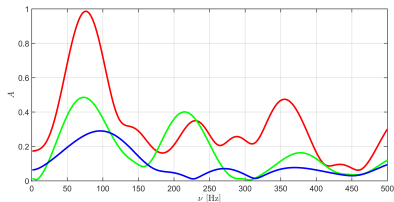
Верхний слой – глина



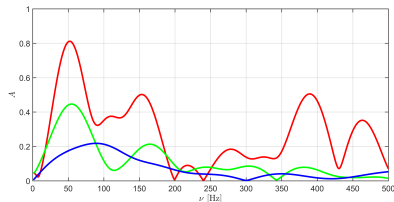
Верхний слой – твердый грунт



Амплитудно-частотные зависимости для скорости  $v_1$  частиц среды на глубине 30 м



Верхний слой – вода



Верхний слой – лед, средний слой – вода

Система точек под трассой,  
проходящей в направлении оси  $x_2$   
вблизи плоскости симметрии:

красная линия относится к точке под источником  
зеленая линия – к срединной точке слева  
синяя линия – к крайней левой точке





Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V., Detkov V.A. Analysis of elastic waves generated in frozen grounds by means of the electromagnetic pulse source “Yenisei” // *Polar Mechanics* 2018. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. V. 193. P. 012058-1–012058-7. DOI: 10.1088/1755-1315/193/1/012058 <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/193/1/012058>



Садовский В.М., Садовская О.В. Анализ сейсмических волн, генерируемых импульсным электромагнитным источником “Енисей”, с применением высокопроизводительных вычислений // *Вестник ВКГТУ / Вычислительные технологии: Совм. выпуск. По материалам Междунар. конф. “Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании” – CITech–2018*. 2018. Т. 1, ч. 3. С. 215–223.



Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V., Polyakov V.S. Analysis of acoustic waves excited in near-surface soils by means of the electromagnetic pulse source “Yenisei” // XLVI International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics” – APM 2018. *Materials Physics and Mechanics*. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2018. 8 p. (в печати)





- Компания “ГЕОТЕК Холдинг” разработала специальный экологически чистый импульсный источник сейсмических колебаний “Енисей”, акустические волны от которого являются предметом анализа с использованием высокопроизводительных вычислений в наших исследованиях.
- Разработана вычислительная технология и комплекс параллельных программ для детального изучения волновых полей, возбуждаемых источником “Енисей”, в блочно-слоистых массивах геосред с различными свойствами слоев. Проведенные численные эксперименты показали, что основная частота вертикальной скорости, независимо от материала поверхностного слоя (глина, твердый мерзлый грунт, вода, ледовое покрытие воды), лежит в характерном для сейсморазведки диапазоне от 30 до 100 Гц.
- Вычислительные эксперименты показали, что предложенная суперкомпьютерная технология позволяет с высокой степенью детализации и точности в пространственной постановке воспроизвести систему волн вблизи областей возбуждения сейсмических колебаний импульсным электромагнитным источником “Енисей”. Необходимым условием для этого является по возможности более точное задание локализованной нагрузки от источника.





- Результаты анализа могут быть использованы при обработке оптимальных режимов функционирования источника, когда механические характеристики поверхностного контактного слоя меняются в широком диапазоне от твердых грунтов с включениями горной породы до сыпучих и глинистых водонасыщенных сред.
- Численный анализ волнового поля вблизи области возбуждения позволяет также получить осредненные данные, необходимые для адекватного моделирования локализованного импульсного воздействия от источника при использовании упрощенных математических моделей для расчета синтетических сейсмограмм отраженных волн на большом протяжении и глубине залегания разнородных слоев в сложнопостроенных горах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-41-242001 р\_мк: “Анализ волновых сейсмических полей, генерируемых электромагнитным импульсным источником “Енисей” в неоднородных грунтовых массивах при проведении геологоразведочных работ в условиях северных районов Восточной Сибири”

**Спасибо за внимание!**