

Визуализация звуковых частот протекания геомеханических процессов с использованием ГИС-технологий

Ю.А. Степанов^{1,A}, Л.Н. Бурмин^{2,B}, А.В. Степанов^{3,A}

^A Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования

"Кемеровский государственный университет"

^B ООО «Сибериан.про»

¹ ORCID: 0000-0001-7552-6857, dambo290@yandex.ru

² ORCID: 0000-0002-9875-231X, Lnburmin@mail.ru

³ ORCID: 0000-0002-9583-0132, stepal@rdtc.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы научной визуализации оцифрованных аудио данных, описывающих изменения геомеханических процессов. Приведен пример визуализации данных в виде трехмерного компьютерного изображения посредством использования графического движка Unity3D. Изложена технология применения программных методов дискретизации звука из преобразования Фурье на основе окна Блэкмана. В статье описан способ кластеризации звукового диапазона в соответствии с пороговыми уровнями. Приведен алгоритм кластеризации шумов на примере слышимого человеком звукового диапазона. Предложен подход к выбору цветовой палитры для визуализации данных, позволяющей воспринимать распределение сведений людям с недостатками зрения. Описан способ преобразования глобальных географических координат в локальные координаты цифровой местности. Предложен метод динамической визуализации аудио данных, позволяющий своевременно принимать управленческие решения по результатам мониторинга горных ударов при ведении очистных работ. Реализованное программное обеспечение интегрируется в состав существующих ГИС, что позволяет осуществлять контроль за состоянием горного массива в целях безопасного ведения горных работ и недопущения остановки технологического процесса, а также прогноза удароопасности обрабатываемых угольных пластов. Декларированы результаты применения предложенного подхода.

Ключевые слова: промышленная безопасность, подземные звуковые сигналы, информационные технологии, геоинформационные системы, окно Блэкмана, аудиоданные, дискретизированный спектр данных, визуализация ума.

1. Введение

Вопросы промышленной безопасности ведения горных работ решаются различными способами. Для решения проблемы безопасности ведения горных работ, целый раздел научных исследований посвящён прогнозированию геомеханических ситуаций, возникающие в горных породах в процессе ведения хо-

зяйственной деятельности промышленных предприятий. Одним из важнейших факторов, влияющих отрицательно на работу очистных забоев, является геологическая нарушенность пласта. К геологическим нарушениям, влияющим отрицательно на работу очистных комплексов, относятся не только нарушения, связанные со смещениями или другими изменениями пласта, но и зоны

выемочных участков со слабыми неустойчивыми кровлями, как правило, склонные к обрушению вслед за выемкой угля. Существенное влияние на устойчивость пород непосредственной кровли оказывает эксплуатационная трещиноватость [1], в результате чего происходит преждевременная потеря устойчивости кровли и может приводить к обрушению пород с возникновением горных ударов.

Разрушительные и чрезвычайные ситуации которые могут возникать в результате ведения горных очистных работ – это следствие известных и неизвестных нам геомеханических процессов протекающие в углепородном массиве. Одним из способов прогнозирования таких процессов является мониторинг сейсмоактивности породного массива, и проведение анализа измеренных показателей амплитуды колебаний недр земной коры, которые не превышают миллионные доли нанометров. Уровень активности геомеханических процессов значительно превышает фоновые значения. Одним из главных деструктивных изменений напряженно-деформированного состояния углепородного массива является интеграция различного рода структурных изменений элементов горного массива (блоков). В результате нарушения сплошности породного массива рождаются звуковые колебания, которые могут служить источником информации для анализа процессов протекающие в недрах земли [2].

С помощью уникальных приборов с датчиками различной чувствительности (геофонов), многие ученые проводят исследования фоновых вариаций в штольнях и скважинах различной глубины. К примеру, для ведения непрерывного геоакустического мониторинга и прогноза удароопасности на месторождении «Антей» используется Автоматизированная система контроля горного давления [3], которая включает в себя:

- сеть подземных геофонов и цифровых преобразователей;
- контроллер передачи данных;

- программное обеспечение для обработки данных с координатной привязкой сейсмоакустических явлений.

Описание проблематики

При работе с оцифрованными данными, полученными в результате исследования различных звуковых сигналов, существует проблема их представления в наглядной форме, т.е. удобной для когнитивного восприятия и оперативной интерпретации. Одной из задач при обработке совокупного массива полученных данных является задача синтеза полученных сведений. Эта задача успешно решается посредством применения ГИС-технологий, позволяющих осуществлять привязку атрибутивных данных, представляющих собой совокупность сведений о нескольких скважинах, либо о нескольких точках измерения шума в пределах выемочного участка к заданному координированному пространству.

Однако визуализация звука в трехмерном пространстве является нетривиальной задачей. Несмотря на полученные в результате исследования данные о пространственном распределении звука, визуализация атрибутивной составляющей остается проблемой, решение которой требует особого подхода. Особенностью подхода видится в необходимости разрешения таких вопросов как:

- возможность выделения категорий, групп или зон, описывающих достижение некоторого критического значения;
- возможность восприятия визуальных данных людьми с недостатками зрения;
- визуализация статической и динамической модели данных.

Эти три вопроса могут быть объединены необходимостью определения групп данных, объединенные некоторыми граничными условиями: цветовой диапазон, однородность значений внутри группы или временной интервал описания данных и т.п.

Кластеризация звукового диапазона

Первым этапом решения поставленной задачи является разбиение непрерывного частотного диапазона на кластеры. Для примера, приведем разбиение слышимого человеком диапазона частот, составляющего от 16Гц до 20 000Гц. Пропорциональное разбиение в данном случае приведет к ошибкам квантования, поскольку, в таком случае, в одном диапазоне будут находиться данные, описывающие качественно разные ситуации.

Стоит отметить, что обработка звука с помощью цифровых средств осуществляется посредством процедуры дискретизации (sampling). В качестве инструмента визуализации была использована среда разработки Unity3D, в составе которого присутствует метод (GetSpectrumData) внутри класса AudioSource [4]. Данный метод предоставляет блок данных спектра звука, воспроизводимого в данный момент времени. Для использования такого метода необходимо инициализировать массив вещественных чисел фиксированной длины, например:

```
float[] _samples = new float[512]
```

Метод передает данные в инициализированный массив, присваивая каждому его элементу дискретизированное значение аудио спектра. Стоит отметить, что размерность массива дискрет для преобразования в ряды Фурье, должна быть кратна степени двух, например: 64, 128, 256 и т.д. Минимальное значение

составляет 64 дискреты, а максимальное – 8192. Для уменьшения ошибки квантования, возможно использование одного из нескольких типов окон для анализа спектра посредством аппроксимации ряда Фурье, которым кодируется аудиоспектр [5]. Под ошибкой квантования в данном случае понимается потеря данных, полученная в результате округления амплитуды сигнала до ближайшего порогового значения дискреты. Чем выше применяемое разрешение окна (выраженное в более точной весовой функции), тем лучше качество спектра, но тем ниже скорость вычислений. В качестве компромиссного варианта предлагается использовать окно Блэкмана (Blackman) представленное на рисунке 1. Оно определяется как:

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$
$$a_0 = \frac{1-\alpha}{2}; a_1 = \frac{1}{2}; a_2 = \frac{\alpha}{2}$$

где a_0, a_1, a_2 – это коэффициенты аппроксимации,

α – нормализованный уровень боковых лепестков

По общему соглашению термин «окно Блэкмана» относится к «приблизительному» окну Блэкмана со значением уровня боковых лепестков $\alpha = 0,16$ ($a_0 = 0,42$, $a_1 = 0,5$, $a_2 = 0,08$). Существует более близкая аппроксимация, которая носит название «достоверное» окно Блэкмана с $a_0 = 7938/18608 \approx 0,42659$, $a_1 = 9240/18608 \approx 0,49656$ и $a_2 = 1430/18608 \approx 0,076849$.

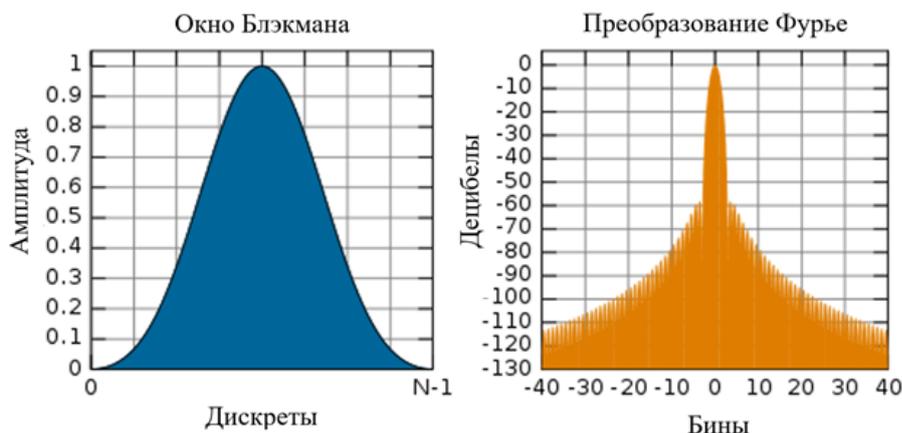


Рис. 1. Окно Блэкмана

Эти точные значения помещают нули на третий и четвертый боковые лепестки бинов, но приводят к разрыву на краях и отклонению 6 дБ / окт. Усеченные коэффициенты также не уменьшают боковые лепестки, но имеют улучшенное снижение на 18 дБ / окт [6].

После получения дискретизированного спектра его необходимо разбить на кластеры. В случае, если массив состоит из 512 элементов, а рассматриваемый диапазон находится в пределах до 20 050 Гц, можно сделать вывод о том, что на одну дискрету приходится участок примерно в 43 Гц. В общем диапазоне выделяют внутренние диапазоны, соответствующие уровню звука [7]:

- 20 Гц - 60 Гц;
- 60 Гц - 250 Гц;
- 250 Гц - 500 Гц;
- 500 Гц - 2000 Гц;
- 2000 Гц - 4000 Гц;
- 4000 Гц - 6000 Гц;
- 6000 Гц - 20000 Гц.

Дискретизированные данные в соответствии с указанными диапазонами приведены в таблице 1.

Таблица 1. Распределение дискрет по кластерам

Номер	Кол-во дискрет, шт	Нижний предел частоты, Гц	Верхний предел частоты, Гц	Длина диапазона, Гц
0	2	0	86	86
1	4	87	258	172
2	8	259	602	344
3	16	603	1290	688
4	32	1291	2666	1376
5	64	2667	5418	2752
6	128	5419	10922	5504
7	256	10923	21930	11008
СУММА	510			21930

Таким образом, в данном случае формируется 8 кластеров-каналов. Диапазонные немного отличаются от приведенных в начале, но этим различием можно пренебречь. Если сложить все диапазоны дискрет, то в итоге сумма бу-

дет равна 510, что на 2 меньше от изначально заданного количества элементов. Для минимизации потерь условимся, что эти 2 дискреты присоединяются к последнему каналу. Вычисление текущего значения канала осуществляется посредством нахождения среднего арифметического для значений соседних дискрет. Ниже представлен один из вариантов программного кода, реализованный на основе описанной выше технологии кластеризации частот шумовых диапазонов.

```
float[] _freqChannel= new float[8];
void MakeChannels() {
    int count = 0;
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        float avg = 0;
        int sampleCount = (int)
Mathf.Pow(2, i) * 2;
        if (i == 7) {
            sampleCount += 2;
        }
        for (int j = 0; j < sampleCount;
++j) {
            avg+=samples[count]*(count+1);
            ++count;
        }
        avg /= count;
        _freqChannel[i] = avg;
    }
}
```

Управлять визуализацией восьми единиц данных существенно проще, чем 20 000 или 512. В случае необходимости, количество кластерных единиц возможно увеличить для более подробной визуализации данных путем уменьшения количества дискрет в одном кластере. Таким образом решен первый вопрос - выделение категорий.

Определение цветового спектра
Для решения второго вопроса необходимо определить палитру. Палитра должна отвечать нескольким требованиям:

- обладать достаточным набором цветов для отображения данных;
- обладать различимостью цветов;
- подходить для людей с недостатками зрения.

Для решения проблемы определения количества цветов достаточно исполь-

зовать непрерывный градиент. В большинстве случаев, если необходимо выделить краевые области, используется градиент от красного к зеленому или от красного к синему как показано на рисунке 2.

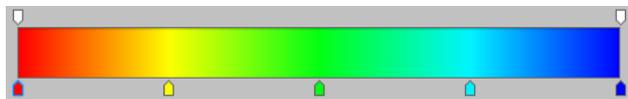


Рис. 2. Пример полноцветного градиента

Однако такой подход не удовлетворяет потребностям людей с недостатками зрения (дейтераномалия, протанопия, ахроматопсия). В связи с этим лучше использовать градиенты, основанные на яркости цвета. Различимость цветов достигается посредством «наложения» градиента серого: цветовые градиенты начинаются с белого и заканчиваются черным (рис. 3).

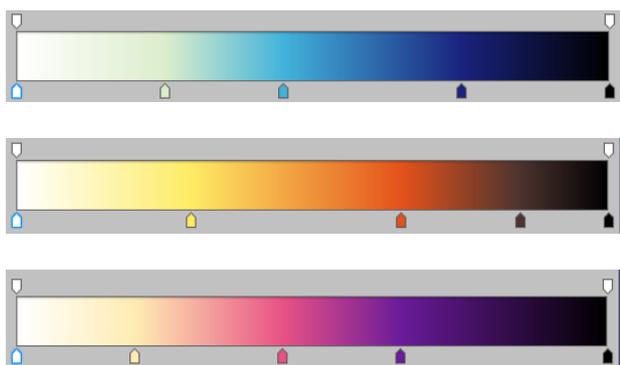


Рис. 3. Градиенты, различимые людьми с недостатками зрения

Визуализация данных в виртуальном координированном пространстве.

Для размещения данных в пространстве используется географическая координата точки сбора данных, приведенная к локальной системе координат

пространства трехмерной сцены по следующему алгоритму:

$$x = \frac{long \cdot 20037508.34}{180} \cdot \frac{1}{100}$$

$$z = \log \left(\tan \left(\left(90 + lat \right) \cdot \frac{\pi}{360} \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$z = \frac{z \cdot 20037508.34}{180} \cdot \frac{1}{100}$$

где $long$ – значение долготы координаты

lat – значение широты координаты.

В качестве высоты (координата Y) присваивается одно из значений канала, как правило, наиболее значимого. Второй по значимости канал можно назначить на изменение цветового градиента элемента. Порядок значимости каналов определяется пользователем. В случае, если определить значимость не представляется возможным, предлагается поочередно назначать каждый канал данных на соответствующие визуальные составляющие (высоту или градиент) для получения наиболее качественного (с точки зрения пользователя) изображения. Результат процесса визуализации представлен на рисунке 4.

Для визуализации динамической модели изменения шума необходимо снимать аудиосигнал в течении продолжительного времени. Используемый инструмент визуализации позволяет обращаться к данным аудиофайла примерно 60 раз в секунду без значительного снижения производительности. Таким же образом возможен мониторинг данных в режиме онлайн. Примером применения подхода является акустическая съемка для оценки сейсмической активности земной породы в подземной шахте при ведении горных работ.

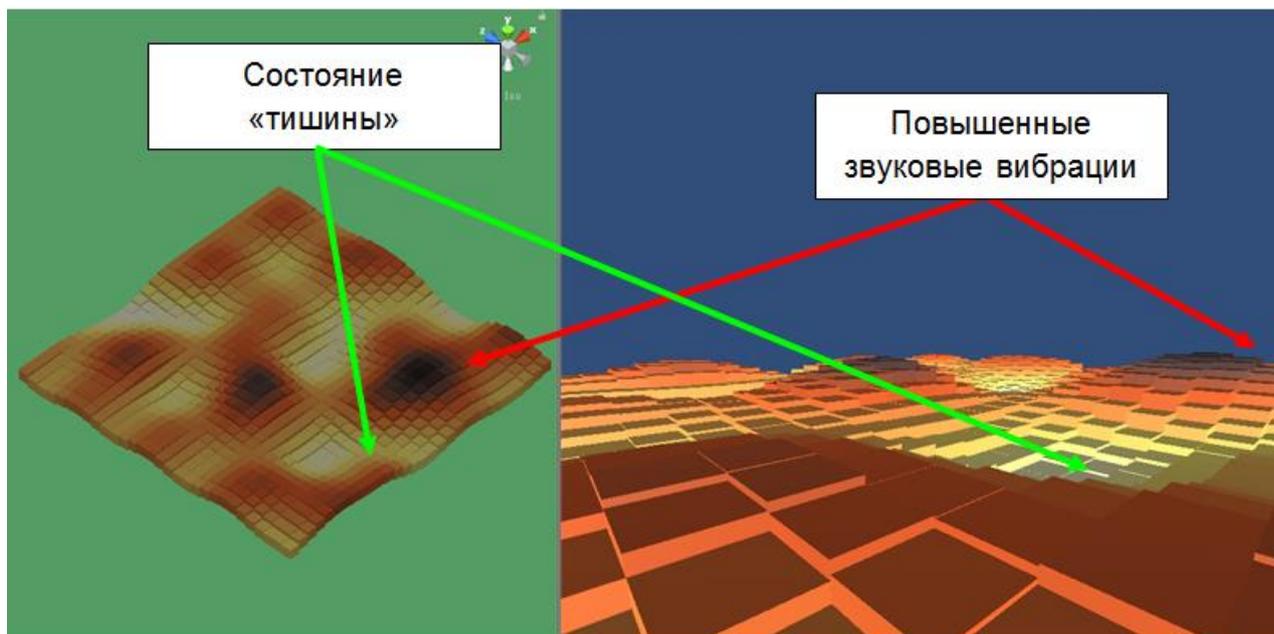


Рис. 4. Пример визуализации аудио данных

Реализованный программный модуль визуализации аудиосигналов с описанными технологиями прошел апробацию в составе подсистемы «Трески», обеспечивающая контроль сейсмоэнергетического состояния массива горных пород в режиме «тишина», т.е. при простое проходческих и добычных машин. Данная подсистема входит в состав горной ГИС контроля состояния горного массива и прогноза внезапных выбросов и ударов МИКОН-ГЕО предназначена для оперативного обнаружения и контроля состояния зон развития опасных геогазодинамических явлений в процессах подземной разработки месторождений полезных ископаемых, которая соответствует требованиям п.41 ПБ 05-618-03 1. [8]

Заключение

Таким образом, в статье было приведено решение задачи визуализации аудиоданных в режиме реального времени с использованием ГИС-технологий. Предлагаемый способ позволяет предоставлять сведения об изменении геомеханических процессов посредством визуализации аудиоданных в виде динамического трехмерного компьютерного изображения. Реализованное программное обеспечение интегрируется в состав существующих горных

ГИС, что позволяет осуществлять контроль за состоянием горного массива, в целях безопасного ведения горных работ и недопущения остановки технологического процесса. Прогнозирование удароопасности обрабатываемых угольных пластов позволит выявить участки требующие проведения профилактических мероприятий до начала очистных работ.

Применение метода динамической визуализации аудио данных, позволит своевременно принимать управленческие решения по результатам мониторинга горных ударов, что повышает безопасность ведения горных работ.

Список литературы

1. Овчаренко Б. П. Оценка устойчивости кровли очистных выработок по физико-механическим свойствам слагающих пород // Физические процессы горного производства / ЛГИ. Л., 1976. Вып. 3. С. 11–16.
2. Беляков А.С. Феномен подземного звука // Земля и вселенная. 2009. №2. С.36–45
3. Дадиев М.Н. Комплексный мониторинг геомеханической обстановки на урановых рудниках забайкалья // ГИАБ. 2015. №12. С.226-233
4. Unity3D Documentation: AudioSource.GetSpectrumData [Элек-

тронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/AudioSource.GetSpectrumData.html> – (Дата обращения: 14.04.2014).

5. Weisstein, Eric. W., CRC Concise Encyclopedia of MATHEMATICS, Chapman & Hall/ CRC, 2nd ed., 2003.

6. Harris, Fredric J. (Jan 1978). "[On the use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform](#)" (PDF). Proceedings of the IEEE. 66 (1): 51–83. doi:[10.1109/PROC.1978.10837](https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10837). The fundamental 1978 paper on FFT windows by Harris, which specified many windows and introduced key metrics used to compare them.

7. Rossing, Thomas (2007). Springer Handbook of Acoustics. Springer. pp. 747, 748. ISBN [978-0387304465](https://www.isbn-international.org/product/978-0-387-30446-5).

8. Лапин С.Э., Писецкий В.Б. К разработке геоинформационной панели безопасности подземных горных работ на основе связанных решений по прогнозу развития напряженного состояния массива горных пород и газовых потоков. Чебышевский сборник. 2017;18(3):350-362. DOI:[10.22405/2226-8383-2017-18-3-350-362](https://doi.org/10.22405/2226-8383-2017-18-3-350-362)