



ГЕОФИЗИКА

Обзорная статья

УДК 550.834

EDN: DQCZBW

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16



Проблемы динамического диапазона и информативности изображения при визуализации сейсмических данных

А.Г. Дмитриев^{a✉}, М.А. Дмитриева^b, А.С. Ковалев^c^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель данного обзора заключалась в рассмотрении проблемы визуализации сейсмических данных применительно к возможностям зрения человека на основе оценки динамического диапазона сигналов сейсморазведки. Были изучены пути увеличения информативности и эффективности способов визуализации относительно повышения их разрешающей способности. В результате анализа выяснено, что динамический диапазон сейсмических записей на 2–3 порядка превышает возможности человеческого глаза и на 4–5 порядков – технические средства визуализации. На примере наиболее универсальной аппаратно-аддитивной RGB-модели рассмотрены модели цветового зрения. Выбор модели основан на представлении о системе зрения человека как о совокупности светочувствительных клеток, реагирующих на красный, зеленый и синий цвета, и мозга, обрабатывающего и формирующего в сознании человека цветовой образ объекта. Установлены взаимосвязи между монохромным и цветным изображениями, воспринимаемыми человеческим глазом на основе нескольких видов чувствительных рецепторов. Сделан вывод, что при использовании цветного изображения информационные возможности значительно расширяются. Так, при монохромном способе вывода информации достаточно 8 ступеней серого, тогда как использование цветных устройств позволяет увеличить количество ступеней до 14. Методология решения данной проблемы заключается в использовании новых технологий, основанных на применении крупномасштабных и объемных изображений, обеспечивающих на основе расширения динамического диапазона значительное повышение значений светового потока, разрешения и контрастности, исходя из пределов возможности человеческого зрения.

Ключевые слова: динамический диапазон, монохромное, цветовое зрение, разрешающая способность, информативность, RGB-модель, визуализация, сейсмические данные

Для цитирования: Дмитриев А.Г., Дмитриева М.А., Ковалев А.С. Проблемы динамического диапазона и информативности изображения при визуализации сейсмических данных // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 6–16. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16>. EDN: DQCZBW.

GEOPHYSICS

Review article

Dynamic range issues and image information content when visualizing seismic data

Alexander G. Dmitriev^{a✉}, Mariya A. Dmitrieva^b, Alexander S. Kovalev^c^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of this review is to discuss the problem of seismic data visualization in relation to human vision capabilities based on the seismic signal dynamic range assessment. The ways of increasing the information content and efficiency of visualization methods in terms of increasing their resolution are considered. The conducted analysis has shown that the dynamic range of seismic recordings exceeds the capabilities of the human eye by 2–3 orders of magnitude and the capabilities of technical visualization means by 4–5 orders of magnitude. Color vision models are considered on example of the most versatile hardware additive RGB color model. The model was chosen based on the idea of the human vision system as a set of photosensitive cones that register red, green and blue colors and the human brain, which processes and forms a color image in one's consciousness. The relationships between monochrome and color images perceived by the human eye based on several types of sensitive receptors have



been established. It is concluded that the use of a color image significantly expands information capabilities. Thus, 8 grey steps are enough for the monochrome method of information output, whereas the use of color devices allows to increase the number of steps up to 14. The methodology for solving this problem consists in the application of new technologies based on the use of large-scale and three-dimensional images providing a significant increase in the values of luminous flux, resolution and contrast based on the expansion of the dynamic range taking into consideration the limits of human vision.

Keywords: dynamic range, monochrome color vision, resolution, information content, RGB model, visualization, seismic data

For citation: Dmitriev A.G., Dmitrieva M.A., Kovalev A.S. Dynamic range issues and image information content when visualizing seismic data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):6-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-6-16>. EDN: DQCZBW.

Введение

В настоящее время повысился интерес к цветной графике не только как к способу вывода сейсмической информации, но и как к методу обработки и интерпретации изображений. Поскольку имеется огромное количество цветов, их эффективный синтез, хранение и передача нуждаются в количественном обосновании, выработке соответствующих требований и методик их представления.

Большое значение для уверенного выделения, прослеживания и идентификации стратиграфических элементов на временных или глубинных сейсмических разрезах имеет оптимальный выбор способа и масштаба изображения. В настоящее время в арсенале обработчиков имеется несколько способов визуализации данных сейсморазведки. Основными из них является метод отклонений, переменных амплитуд (переменной ширины), комбинированный метод и метод переменной плотности в черно-белом или цветном вариантах^{1,2}. Кроме того, для повышения информативности отчетных материалов применяется метод цветового кодирования, при котором на сейсмограммы накладываются в соответствующих цветовых градациях такие сейсмические атрибуты, как амплитуда, частотный диапазон, фазовые или скоростные характеристики с привязкой к определенным интервалам временных или глубинных разрезов.

Анализ динамического диапазона монохромного и цветного изображений

Главной характеристикой, определяющей разрешающую способность каждого метода визуализации, является динамический диапазон человеческого глаза D_{HS} , dB. Данный диапазон можно найти по формуле

$$D_{HS} = 20 \lg \left(\frac{A_{max}}{A_{min}} \right),$$

в которой A_{max} и A_{min} – максимальная и минимальная амплитуды сигнала соответственно.

В эпоху аналоговой регистрации основными методами визуализации были методы отклонений и переменной плотности в черно-белом варианте. При использовании метода отклонений динамический диапазон глаза человека с нормальным зрением при прямом солнечном освещении, по самым оптимистичным оценкам, определяется способностью наблюдать на расстоянии вытянутой руки синусоиду амплитудой $A_{min} = 1$ мм, наложенную на синусоиду амплитудой $A_{max} = 1$ м, что составляет 60 dB, или разницу в 100 раз. Подобное условие связано с величиной комфортного расстояния при чтении с возможностью адаптации сканирования в полной мере в едином цикле рассмотрения (стробирования) рисунка глазом.

В реальности при использовании комбинированного способа переменной ширины, реализуемого путем однотонового зачернения положительных или отрицательных значений амплитуд, при расстоянии между сейсмическими трассами на временных разрезах 10 мм динамический диапазон не превышает 26 dB.

Более широкими возможностями обладает метод переменной плотности или тонокодирования, реализуемый путем зачернения, степень которого определяется амплитудой сигнала. Основной единицей измерения степени зачернения в фотографии является двоичная f -ступень f_{st} , соответствующая яркости в один кандел на квадратный метр (cd/m^2). При монохромном изображении динамический диапазон определяется контрастностью, то есть

¹ Шерифф Р.Е. Англо-русский энциклопедический словарь терминов разведочной геофизики. М.: Недра, 1984. 351 с.

² Англо-русский энциклопедический словарь по геофизике / авт.-сост. А. В. Михальцев и др.; отв. ред. В. А. Ерхов. М.: Агентство ЭМП; Геодар, 2009. 940 с.



соотношением яркостей наиболее светлого (уровень белого) и наиболее темного (уровень черного) предмета на плоскости изображения в степенях двойки (рис. 1). Иначе говоря, на временном разрезе с динамическим диапазоном яркости в $8 f_{st}$ – белый цвет в $2^8 = 256$ раз, то есть на 48 dB ярче черного.

Зрение человека является предметом пристального изучения уже довольно длительное время. В настоящее время накоплена обширная база экспериментальных данных о его свойствах, что позволяет сделать ряд важных и интересных заключений о тех или иных конкретных ситуациях. Однако этих данных еще недостаточно для построения исчерпывающей математической модели зрения.

Глаз человека, как естественный приемник оптического излучения, является великолепной системой. Наши глаза дают нам возможность воспринимать размеры, форму, фактуру, блеск, прозрачность, мерцание, цвет объектов и т. п. Конечно, он не обладает такой зоркостью, как глаз орла или чувствительностью, как глаз совы. Динамический диапазон зрения человека лежит в пределах от 2^{-6} до 2^8 cd/m², что составляет $14 f_{st}$ (90 dB). Правда мы не можем воспринимать свет всего этого

диапазона одновременно. Зрение должно постепенно настроиться на нужный диапазон изменения освещенности, от солнечного дня к безлунной ночи. Максимальный диапазон интенсивностей, доступных глазу человека в одно время – около 2^6 – $2^8 f_{st}$. Это мгновенный динамический диапазон нашего глаза (при неизменной ширине зрачка), который можно получить при детальном рассмотрении одного участка разреза, не глядя никуда более и дав глазам настроиться (рис. 2) [1].

Приспособливание зрения к более широкому диапазону освещенности осуществляется посредством механизма, известного как адаптация. Когда вы входите с улицы в темное помещение, требуется некоторое время, чтобы глаза вновь обрели способность видеть. Аналогично при смене темного окружения на светлое зрению также потребуется время для адаптации. Известно, что человек отдельно фиксирует интенсивность (яркость) и цвет света. Это обусловлено двумя типами рецепторов сетчатки глаза – палочками и колбочками.

Палочки регистрируют изменение интенсивности освещения и практически нечувствительны к цвету – это ахроматическое или «ночное» зрение. Палочки активны при малых интенсив-

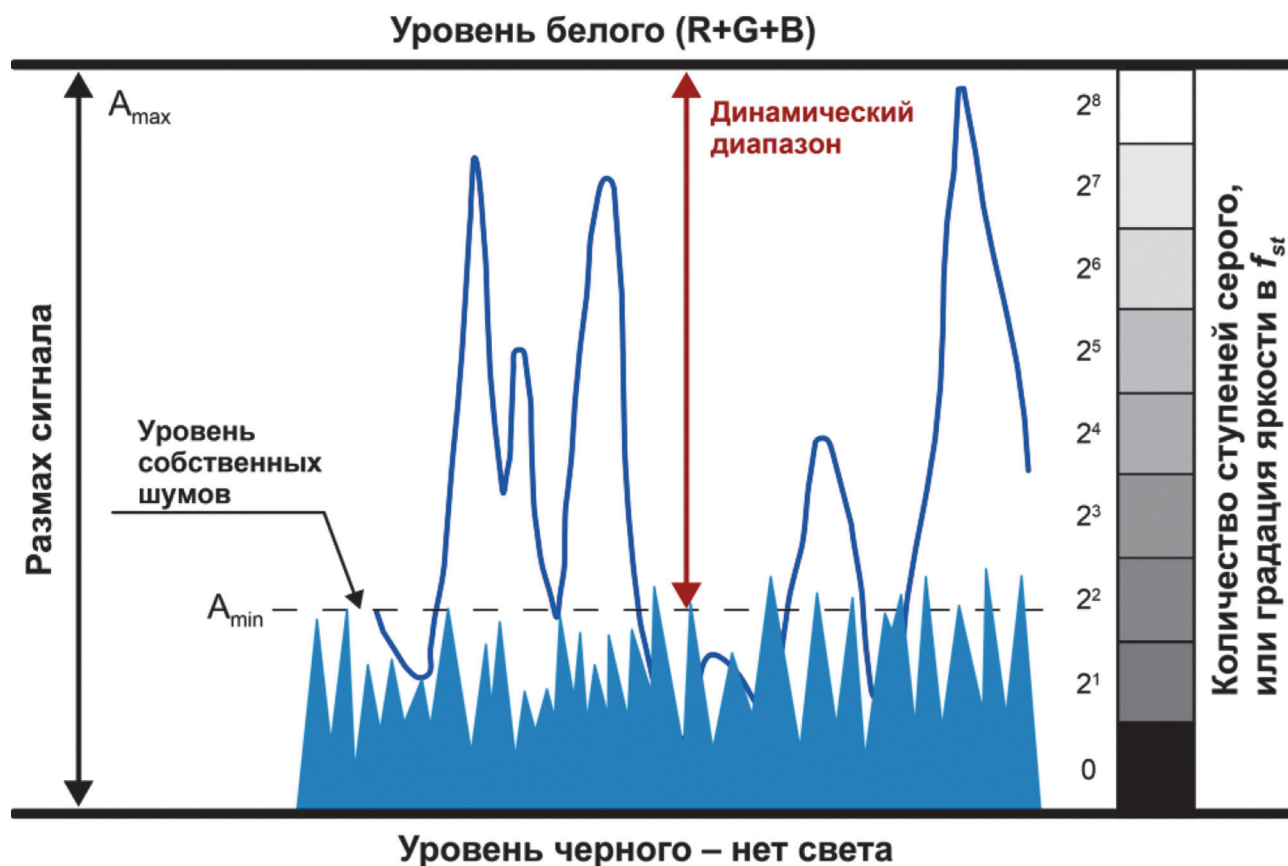


Рис. 1. Динамический диапазон монохромного изображения в f -ступенях
Fig. 1. Dynamic range of a monochrome image in f -stops

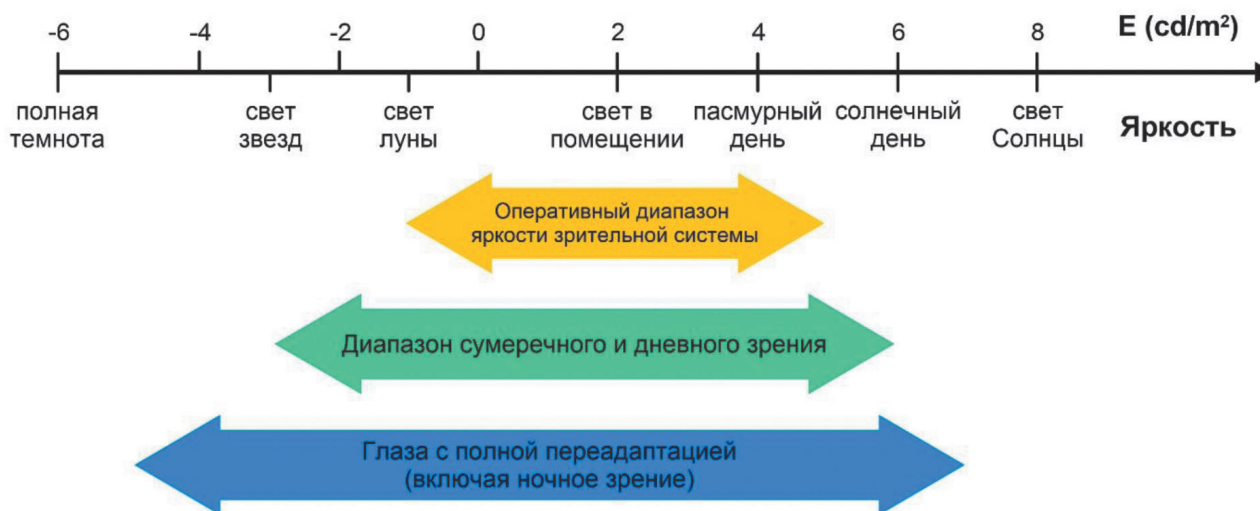


Рис. 2. Диапазоны яркостей зрительной системы человека
Fig. 2. Brightness ranges of the human vision system

ностях цвета в диапазоне от 2^{-6} до 2^{-2} cd/m^2 . Этот интервал получил название scotopic. Колбочки, отвечая за чувствительность к цвету, очень слабо реагируют на изменение его интенсивности – это хроматическое или цветное зрение, которое активно в диапазоне интенсивности освещения в пределах от 2^{+2} до 10^{+8} cd/m^2 . Этот интервал интенсивностей получил название photopic. Область, в которой активны оба типа рецепторов, а зрение одинаково хорошо фиксирует и цвет, и его интенсивность, лежит в пределах от 2^{-2} до 2^{+2} cd/m^2 и называется mesopic. Таким образом, для человека цвет практически неразличим при темном освещении, а при ярком свете мы очень плохо различаем его интенсивность – это основная причина того, что мы не можем видеть звезды днем.

Считается, что человеческий глаз в зависимости от скорости адаптации зрения в реальном диапазоне изменения освещенности подчиняется психофизическому закону Вебера – Фехнера, который гласит: «Полное зрительное ощущение яркости E пропорционально логарифму интенсивности (силе) I падающего в глаз света»³:

$$E = \frac{1}{S} \log_2 I + C \left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right),$$

где S – площадь, m^2 ; C – постоянная, зависящая от адаптационных способностей глаза. Подобный подход позволяет оценить возможности зрения человека в достаточно широких пределах и считать, что человеческий глаз, в зависимости от скорости адаптации зрения в

реальном диапазоне изменения освещенности, может воспринимать динамический диапазон от 6 до 20 f_{st} . Наиболее аргументированным можно считать диапазон порядка 12–16 f -ступеней (рис. 3). Другими словами, на временном черно-белом разрезе с градацией зачернения в 14 f_{st} белый цвет ярче черного в 16384 раза [2]. Это, в зависимости от особенностей зрения, соответствует динамическому диапазону 84 dB. Данный диапазон значительно превосходит соответствующие параметры практически всех современных технических устройств, величина которых не превышает 6–7 f_{st} .

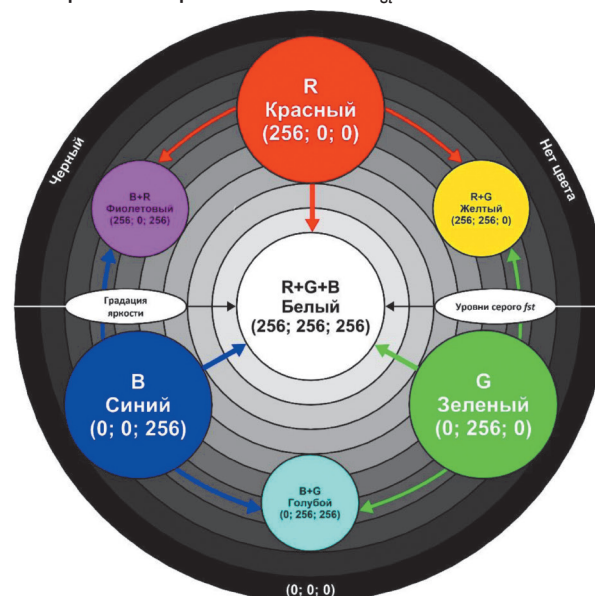


Рис. 3. Аддитивная аппаратно-зависимая RGB-модель цветового зрения
Fig. 3. An additive hardware-dependent RGB color vision model

³ Недзведь О.В., Лещенко В.Г. Оптика глаза. Основы биофизики зрения: учеб.-метод. пособие. Минск: Изд-во БГМУ, 2008. 35 с.



При использовании цветного изображения информационные возможности расширяются. Цвет – одно из свойств объектов материального мира, воспринимаемое как зрительное ощущение. Под цветовосприятием понимают способность дифференцировать различные длины волн и их композиции. Цвет характеризуется такими свойствами, как цветовой тон (длина волны), яркость и насыщенность, которые могут быть измерены соответствующими инструментами. Наиболее важный атрибут цвета – цветовой тон, который может быть «чистым» или «смешанным», когда получаются разные оттенки цвета. Насыщенность – соотношение в составе цвета основного цветового тона и равного ему по яркости бесцветного белого³.

В настоящее время существует множество специализированных и универсальных систем анализа цветов. Примерами таких систем являются: «Словарь цвета Мэрца и Пауля» (1930), цветовая система Нью-Хью, разработанная Фоссом (1946), «Руководство по цветовой гармонии», основанная на системе Освальда (1948), цветовая карта DIN, разработанная М. Рихтером, которая является официальным немецким стандартом (1950), шведская система естественных цветов, основанная на модели Геринга – Иогансона и доведенная Р. Хантером до практического воплощения в виде атласа цветов (1966). В 1973 г. ассоциация полиграфистов предложила новую карту цветов, называемую «Цветовой системой Фосса». Существует множество специализированных цветовых систем-карт: для красок, почв, минералов, нефти, дыма, масел и т. п. [3]. Однако одним из наиболее общепринятых стандартов цвета является атлас цветов Манселла [4].

В теории цвета существует несколько моделей. Наиболее универсальными моделями описания изображений являются цветовые модели RGB и CMYK. Аддитивная аппаратно-зависимая RGB-модель разрабатывалась для таких устройств отображения, как электронно-лучевые трубки, плазменные или матричные жидкокристаллические дисплеи, мультимедиа проекторы. Поэтому RGB-модель используется в системах, построенных на излучении света, что делает ее самой распространенной, с ней работают все экраны. В соответствии с этой моделью любой цвет может быть получен смешением трех основных (чистых) цветов. Цвета считаются основными, если ни один из них нельзя получить смешени-

ем двух других. Можно создать множество вариантов трех основных цветов, но чаще всего в качестве таковых берутся цвета: красный – R, зеленый – G и синий – B с подобранными соответствующим образом интенсивностями. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что по современным представлениям система человеческого зрения состоит из светочувствительных колбочек, регистрирующих красный, зеленый и синий цвета, и мозга, который суммирует, обрабатывает и формирует в нашем сознании цветовой образ. Таким образом, восприятие цвета является сложнейшим психофизиологическим процессом.

В модели RGB цвета определяются как смесь стандартизированных линейно независимых базисных функций, известных под названием функций основных цветов или тристиmulьных величин. Отображение трехцветных механизмов в зрительной RGB-системе можно представить как комбинацию функций основных цветов. Согласно этой модели, черный цвет представляется как (0, 0, 0), то есть полное отсутствие света. Смешение равных значений трех компонентов дает различные оттенки серого. При максимальной интенсивности трех основных цветов (256, 256, 256) формируется белый свет [1]. При смешении в различных пропорциях основных цветов получаются все остальные. Например, при смешении красного и зеленого получаем желтый (см. рис. 3).

Восприятие сигналов соответствует различным уровням серого, начиная от черного до белого. Считается, что около восьми уровней серого достаточно для отображения приблизительно 95 % всей информации, представленной в тонокодированном виде. Интенсивность каждого основного цвета представляется в виде 256 оттенков (градаций интенсивности). Число 256 довольно произвольно и появилось в результате компромисса между производительностью графической подсистемы компьютера, требованием фотореалистичности изображений и двоичной природой компьютерных вычислений. В частности, в результате исследований было выяснено, что 16,77 млн оттенков (256×256×256) вполне достаточно (144 dB) для передачи изображений самого высокого фотографического качества. К тому же 256 довольно просто кодируется в двоичной системе как 2^8 , то есть один байт. К этой особенности, вероятно, относится и оценка диапазона зрения человека в $14 f_{st}$, что со-



ответствует двухбайтовому числу. Следует отметить, что данная система в природе не единственная. Так, у стрекоз выявлена пентастимульная система, дополнительно регистрирующая, кроме видимого света, ультрафиолетовую и инфракрасную части спектра.

Модель CMYK задает пропорции смешиваемой краски на листе бумаги. Цветовое пространство CMYK – субтрактивное: если сложить все цветовые компоненты, то итоговый цвет будет черным. По этому же принципу работают обычные краски, а потому пространство CMYK используется исключительно в полиграфии. Через процентные соотношения в нем записаны пропорции смешения четырех красок: бирюзовой (Cian), пурпурной (Magenta), желтой (Yellow) и черной (Key color, black). Интенсивность каждого цвета задается в процентах от 0 до 100. Однако следует отметить, что данное число во многом произвольное. Так, искусствоведы свидетельствуют, что Рембрандт при написании картин всегда использовал только 10 цветовых компонентов (красок), смешивание которых обеспечивало всю требуемую ему цветовую гамму.

Одна из проблем пространств RGB и CMYK состоит в том, что это просто набор значений, которыми должно оперировать устройство вывода: принтер или экран. Реальное отображение цвета, заданного в RGB и CMYK, зависит от множества факторов. При печати – от качества краски и печатного оборудования, плотности бумаги, влажности воздуха и т. п. На экранах – от качества монитора и его калибровки, мощности лампы в проекторе и т. п. Не говоря уже о том, что на фактическое восприятие цвета глазом существенно влияет внешнее освещение.

Аддитивной, но аппаратно-независимой является цветовая модель CIE 1976 L*a*b (LAB), которая в настоящее время является международным стандартом. LAB – это аббревиатура из названий трех координат. Первая L – координата, которая отвечает только за светлоту (яркость), которую можно изменять от «самое темное – 0» до «самое светлое – 100». А – координата, определяющая положение цвета в диапазоне от зеленого до красного. В – координата задающая значение от синего до желтого. Таким образом, получается, что светлота задается отдельно от тона и насы-

щенности. В связи с тем, что LAB – аппаратно-независимая система и определяет цвет однозначно, она в основном применяется как промежуточное цветовое пространство, через которое происходит конвертирование цвета между другими цветовыми пространствами. Например, LAB по умолчанию используется в Adobe Photoshop [5]. К тому же LAB, благодаря возможности отдельно воздействовать на светлоту и очень широкому цветовому охвату, широко используется в программах цветовой коррекции. Данная модель имеет цветовой охват, настолько превосходящий охват модели RGB, что появился термин «скрытые цвета», то есть цвета, которые не видит человеческий глаз. Однако возможности данного явления пока не определены.

Практически любой цветовой сигнал, несмотря на его модель, может быть сопоставлен с одним из образцов атласа Манселла, в которых для различных категорий пользователей дан набор визуально очень близко расположенных образцов в диапазоне оттенков от 10 до 32 f_{st} . Г. Буксгаум и С. Бедроян [2] вывели эмпирическую зависимость между диапазоном уровней f_{st} и количеством цветовых оттенков N :

$$N \approx 0,074 f_{st}^3.$$

Исходя из данной зависимости, при 14 f -ступенях зрительная система человека обеспечивает восприятие примерно 200 цветов. Специалисты считают, что обычный человек в состоянии различить от 150 до 800 цветов в зависимости от особенностей зрения. В то же время имеются исключения. Историки утверждают, что великий русский художник И.Е. Репин различал до 1200 оттенков различных цветов, что соответствует 25 f_{st} .

Результаты исследования и их обсуждение

Однако все не так просто. Анкетирование 50 студентов по количеству определяемых оттенков на цветовом тесте (рис. 4) показало, что цветовое восприятие – это самый сложный психофизиологический процесс. Тест⁴ с различным количеством цветов в каждом ряду был отпечатан на глянцевого фотобумаге на высококачественном профессиональном цветном фотопринтере.

⁴ Войцеховский А.Г. Красочный мир // Youtube. Режим доступа: <https://youtu.be/2gwa1mpxEPM> (дата обращения: 15.12.2023).

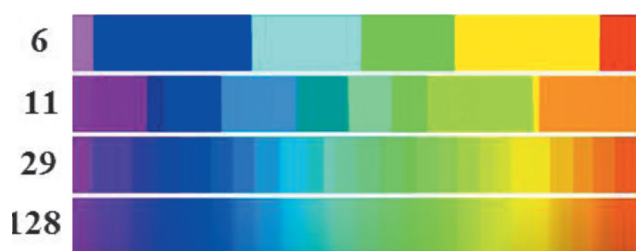


Рис. 4. Четырехрядный цветовой тест
Fig. 4. Four row color test

Практически все анкетированные точно определили количество цветов равное 6 в первом ряду (нет фиолетового). Только один испытуемый, в качестве реакции на вводную информацию о том, что спектр белого состоит из 7 компонент, разделил широкую синюю полосу на 2 оттенка. 94 % анкетированных правильно определили количество цветов во втором ряду. Количество же цветов в третьем и четвертом рядах, содержащих 29 и 128 оттенков соответственно, не определил ни один из анкетированных. Своеобразная «недостача цветности» колебалась от 3 до 8 оттенков.

Результаты тестирования показывают, что количество обычно используемых цветов намного превышает то, которое требуется для представления изображений. Это позволяет сделать некоторые методические выводы. При монохромном (черно-белом) способе вывода информации достаточно $8 f_{st}$ серого. В случае использования высококачественных цветных устройств количество f_{st} может быть увеличено до 14. Дальнейшее увеличение оттенков на градиентных цветовых шкалах практически бессмысленно (см. рис. 4).

На рис. 5 на одном и том же временном разрезе приведены различные способы визуализации. Визуализация осуществлялась с использованием системы обработки RadExPro, которая обладает не самым многофункциональным набором способов. Разрез получен по результатам 12-кратного профилирования с использованием фланговой системы наблюдений методом общей глубинной точки при расстоянии между одиночными сейсмоприемниками в 10 м и возбуждении упругих колебаний кувалдой. Участок характеризуется сложным тектоническим строением,

горным рельефом и развитием многолетней мерзлоты.

При подобной геологической обстановке традиционный способ визуализации – комбинированный метод переменной ширины в монохромном варианте (см. рис. 5, а), который характеризуется небольшим динамическим диапазоном и плохо иллюстрирует особенности волнового поля. При высокой плотности сейсмотрасс динамический диапазон на 1 мм разреза составляет всего 6 dB. На разрезах превалирует эффект клиппирования, оси синфазности отражающих горизонтов в целевом интервале глубин прерывисты, а наличие интенсивных дифрагированных волн затрудняют расшифровку волновой картины. Это не значит, что данные способы использовать нецелесообразно. Просто необходимо повышение информативности изображения, что возможно за счет применения метода переменной плотности (см. рис. 5, б). В полихромном варианте при цветовой гамме в $14 f_{st}$ данный метод обеспечивает динамический диапазон 46 dB.

В настоящее время используются два способа применения цвета. Первый обеспечивает формирование изображений по схеме градиентов, второй – на контрастной основе⁵. Подобные приемы позволяют существенно повысить информативность отчетных материалов.

Способ градиентов целесообразно применять в случае необходимости анализа закономерностей изменения амплитуд, характера целостности и формы изображения объектов (см. рис. 5, б). В этом случае имеется возможность наложения на сейсмотрассы в соответствующих цветовых градациях сейсмических атрибутов (энергия, частота, фаза, скорость и т. п.) с привязкой к определенным интервалам временных или глубинных разрезов. Подобный прием позволяет осуществлять корректную идентификацию и привязку цифровых значений сейсмических атрибутов к шкале оттенков цвета, то есть формировать своеобразную интерпретационную легенду соответствия [6]. На рис. 5, с приведен разрез с использованием метода градиентного цветового кодирования с наложением скоростных характеристик. На разрезе однозначно выделяются две зоны. Первая (CDP 700-1100)

⁵ Бондарев В.И., Крылатков С.М. Сейсморазведка: учебник для вузов. Т. 2. Обработка, анализ и интерпретация данных. Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2011. 408 с.

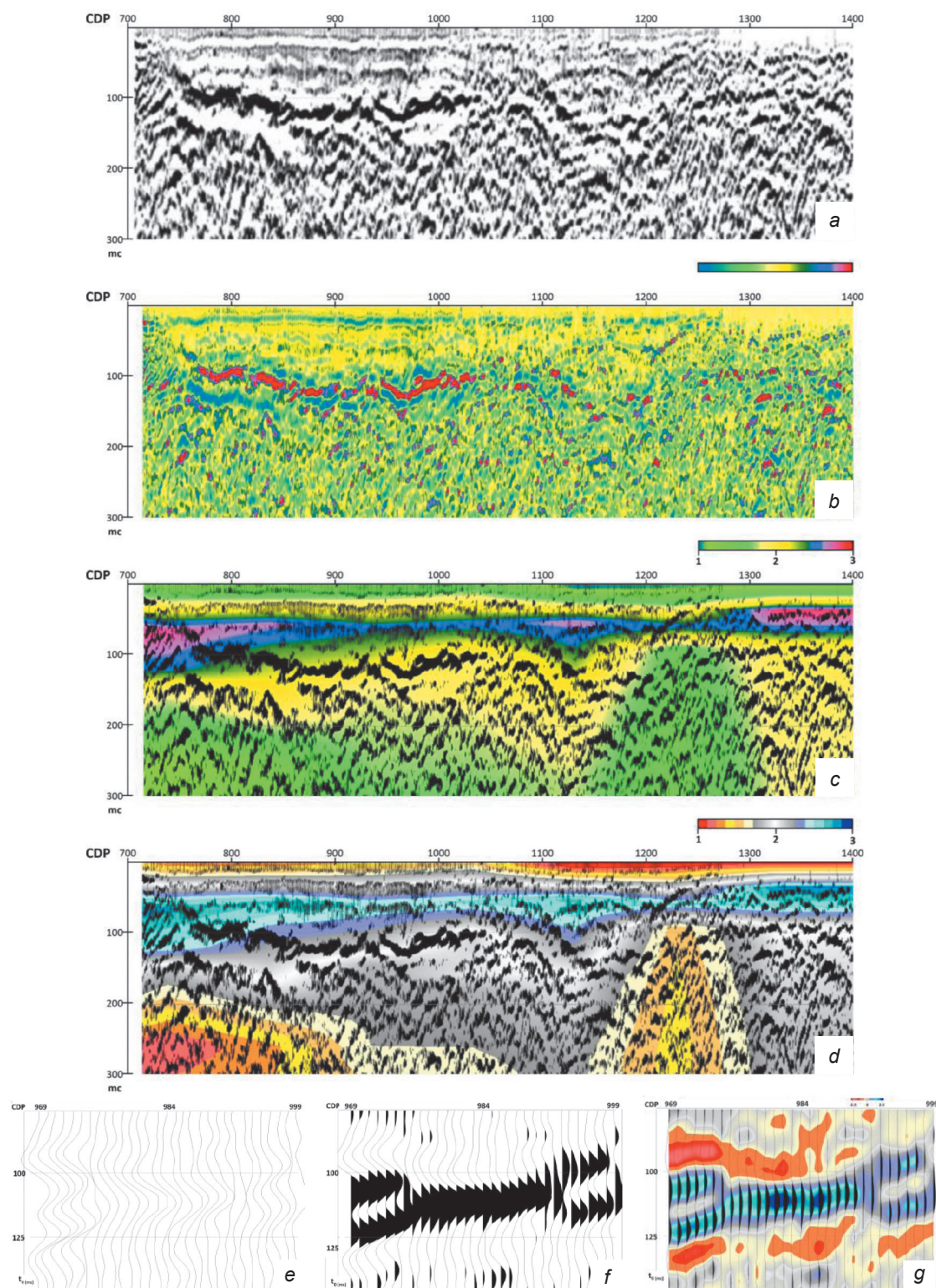


Рис. 5. Изображение временных разрезов:

a – монохромным методом переменной ширины; *b* – полихромным методом переменной плотности; *c* – с наложением скоростных характеристик градиентным методом цветового кодирования; *d* – с наложением скоростных характеристик контрастным методом цветового кодирования; *e–g* – фрагментированные временные разрезы: *e* – методом переменных амплитуд, *f* – комбинационным методом переменной ширины, *g* – комбинационным полихромным методом переменной плотности

Fig. 5. Time section displays:

a – monochrome variable width method; *b* – polychrome variable density method; *c* – with superimposition of velocity characteristics using a gradient color coding method; *d* – with superimposition of velocity characteristics using a contrast color coding method; *e–g* – time sections fragmented by: *e* – a variable amplitude method, *f* – a combined variable width method, *g* – a combined polychrome variable density method



соответствует развитию субгоризонтальных образований, вторая (CDP 1100-1400) характеризуется наличием интенсивных вертикальных неоднородностей. Подобное районирование позволяет на стадии детальной обработки выбрать оптимальную плотность расчета вертикальных спектров скоростей и применять наиболее корректные процедуры интерпретации, целесообразные для каждого типа разреза.

Необходимость увеличения градаций цветности предусматривает использование способа контрастов, который основан на введении разграничительных изолиний между оттенками. Для корректного отображения цветом подчеркиваемых характеристик необходимо тщательно подбирать число цветов с последующим формированием шкалы их соответствия со значениями атрибутов. Поскольку большинство современных систем обработки сейсмической информации не имеют такой опции, обработчики редко используют этот критерий, останавливаясь на выборе цветовых параметров «по умолчанию». В этом случае целесообразно применение псевдо-градиентного способа, при котором цветовая гамма соседних цветов на шкалах соответствует не последовательному изменению частоты зрительного сигнала от красного до фиолетового, а близким расположением на шкале заведомо контрастных по отношению друг к другу оттенков (см. рис. 5, d).

Однако человеческое зрение, несмотря на уникальные способности некоторых индивидуумов, все равно не позволяет охватить весь динамический диапазон регистрируемых сейсмических сигналов, который достигает 160 dB. В связи с этим широко используются различные приемы сужения динамического диапазона сигнала до визуализации, такие как мьютинг, масштабирование, фильтрация, различные способы регулировки усиления и т. п. Более объективные результаты дают последовательный вывод данных (своеобразные переборы) при различных масштабах визуализации, а также использование комбинированных способов вывода информации в разном их сочетании.

В связи с этим наиболее ответственные этапы обработки и интерпретации целесообразно анализировать путем вывода времен-

ных и глубинных разрезов на большие экраны с помощью высоко разрешающих проекторов. Подобные приемы позволяют обработчику целенаправленно фокусировать взгляд на отдельных элементах разреза, обеспечивают возможность выявления тонких амплитудных аномалий с последующим фрагментированием их изображения в более крупном масштабе (см. рис. 5, e–g).

Заключение

Используемая сегодня для представления изображений тристимульная аддитивная аппаратно-зависимая RGB-модель с дискретными интенсивностями низкого динамического диапазона (256:1) описывается целыми числами (8 бит/канал), которые не являются реальными (метрическими) линейными величинами светимости. Такое описание получило название LDRI (Low Dynamic Range Image). Но все же по косвенным признакам эта модель позволяет определить «мегапиксельность» и другие характеристики человеческого глаза. И такие исследования в настоящее время проводятся.

В качестве примера дальнейшего развития подобного подхода можно привести использование особых помещений – вижнариумов (*от англ.: visionarium*), в которых в нескольких перпендикулярных плоскостях располагаются плоские экраны. Так, в специализированном зале фирмы Paradigm Geophysical компьютерная система управляет работой 4000 проекторов, что обеспечивает формирование объемного изображения. Интерпретатор, находясь в таком помещении, вполне осязаемо ощущает себя внутри исследуемой среды, где на стенные экраны в цвете проецируются временные или глубинные разрезы.

Естественно, подобные системы стоят дорого. Однако в настоящее время имеются альтернативные современные системы. Речь идет о лазерных TV-проекторах премиум-класса, которые работают по технологии DPL. Они обеспечивают передачу информации в формате HDR (High Dynamic Range Image) при разрешении 4K, световом потоке свыше 5000 лм и контрастности изображения с динамическим диапазоном до 120 dB. Подобные системы позволяют формировать даже уличные изображения.



Список источников

1. Banterle F., Artusi A., Debattista K., Chalmers A. *Advanced High Dynamic Range Imaging*. Boca Raton: CRC Press, 2011. 352 p. <https://doi.org/10.1201/b11373>.
2. Буксгаум Г., Бедросян С.Д. Зависимость количества цветов от числа уровней серого: количественное соотношение // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1984. Т. 72. № 10. С. 213–215.
3. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 592 с.
4. Munsell A.H. *Atlas of the Munsell color system*. Boston: Wadsworth, Howland & Co., Inc., Printers, 1915. 42 p.
5. Маргулис Д. Photoshop для профессионалов: классическое руководство по цветокоррекции / пер. с англ. М.: Интелбук, 2007. 656 с.
6. Brown A.R. *Interpretation of three-dimensional seismic data*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2004. 542 p.

References

1. Banterle F., Artusi A., Debattista K., Chalmers A. *Advanced High Dynamic Range Imaging*. Boca Raton: CRC Press; 2011, 352 p. <https://doi.org/10.1201/b11373>.
2. Buxgaum G., Bedrosyan S.D. Dependence of the number of colors on the number of grey levels: quantitative relationship. *Trudy instituta inzhenerov po ehlektrotekhnike i radioehlektronike*. 1984;72(10):213-215. (In Russ.).
3. Judd D., Wyszecki G. *Color in Business, Science, and Industry*; 1975, 576 p. (Russ. ed.: *Tsvet v nauke i tekhnike*. Moscow: Mir; 1978, 592 p.).
4. Munsell A.H. *Atlas of the Munsell color system*. Boston: Wadsworth, Howland & Co., Inc., Printers; 1915, 42 p.
5. Margulis D. *Professional Photoshop: the classic guide to color correction*; 2002, 512 p. (Russ. ed.: *Photoshop dlya professionalov: klassicheskoe rukovodstvo po tsvetokorreksii*. Moscow: Intelbook; 2007, 656 p.).
6. Brown A.R. *Interpretation of three-dimensional seismic data*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists; 2004, 542 p.

Информация об авторах / Information about the authors



Дмитриев Александр Георгиевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
профессор-консультант департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ a.g.dmitriev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>
Alexander G. Dmitriev,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Consulting Professor of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ a.g.dmitriev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-9178-1169>



Дмитриева Мария Алексеевна,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
dmitrieva.mariya1@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1830-3648>
Mariya A. Dmitrieva,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
dmitrieva.mariya1@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-1830-3648>



Ковалев Александр Сергеевич,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
aleks.merser2406@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-0829-2038>
Alexander S. Kovalev,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
aleks.merser2406@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-0829-2038>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.Г. Дмитриев – постановка задачи, разработка концепции статьи, методологическое обеспечение, анализ материалов, написание текста статьи.

М.А. Дмитриева – подбор и анализ литературы, формирование концепции визуализации графической части статьи, анализ и обсуждение результатов, написание текста статьи.

А.С. Ковалев – обработка полученных сейсмических данных, подбор графа обработки и способов вывода информации, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Alexander G. Dmitriev defined the problem, developed the concept of the article, provided the methodological support, analyzed the material and wrote the text of the article.

Mariya A. Dmitrieva selected and analyzed the literature, formed the concept of article graphics visualization, analyzed and discussed the results, wrote the text of the article.

Alexander S. Kovalev processed the obtained seismic data, selected a processing graph and methods for data output, discussed the results, wrote the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 19.12.2023; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 19.12.2023; approved after reviewing 19.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.