

МОНИТОРИНГ-КОНТРОЛЬ ШУМОВОЙ ОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

MONITORING-CONTROL OF NOISE HAZARD OF THE ENVIRONMENT

Овчинников Е.Л.

Яшин С.С.

Минаева Т.И.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный
медицинский университет» Минздрава России

Ovchinnikov EL

Yashin SS

Minaeva TI

Samara State
Medical University

Цель — обоснование способа контроля параметров шумовой опасности окружающей среды.

Объекты и методы. Селитебная территория с установленным на ней оборудованием для оценки шумовой опасности, определение спектрального состава реальных шумов.

Результаты исследования. В статье установлена и обоснована связь между интенсивностью (давлением) звуков различных частот и громкостью воспринимаемых человеком тонов как обратный закон Вебера—Овчинникова. Намечены пути исследования рельефа звукового поля и мониторинга акустического пейзажа окружающей среды.

Ключевые слова: закон Вебера—Овчинникова, звуки произвольных частот, звуки произвольных интенсивностей, шум, звуковое поле, рельеф звукового поля, акустический пейзаж.

Aim — justification of the method of monitoring the noise hazard of the environment.

Objects and methods. A residential area with installed equipment to assess noise hazard; determination of the spectral composition of real noise.

Results. The article establishes and substantiates the ratio between the intensity (pressure) of the sounds of different frequencies and the loudness of the perceived tones as the inverse law of Weber—Ovchinnikov. The ways of studying the relief of the sound field and monitoring of the acoustic landscape of the environment are outlined.

Keywords: Weber—Ovchinnikov law, sounds of arbitrary frequencies, sounds of arbitrary intensities, noise, sound field, sound field relief, acoustic landscape.

■ ВВЕДЕНИЕ

Крайнее проявление звука, — шум, особенно высоких энергий, — оказывает негативное воздействие на окружающую среду и самого человека, приводя к стрессам, расстройству психики, болезням, потери ощущения звука вплоть до полной глухоты, разрушению структур организма [1].

Энергетическое воздействие звука в физиологии и психофизике слуха оценивается как громкость тонов. Она является психоакустическим коррелятом восприятия слухом энергии/мощности/интенсивности и давления звука. Физиологическая оценка ощущения звукового раздражения заключается в определении уровня громкости того тона, при котором под действием звуков не наблюдалось бы дисфункции слуха и разрушения структур уха. Энергетическое состояние звукового поля можно представить как акустический пейзаж окружающей среды, а спектральный состав звуков, образующих это звуковое поле, — как его рельеф, непрерывно меняющийся во времени. Непрерывный или дискретный мониторинг состояния звукового поля и измерение его параметров (особенно в спектральной части) продемонстрирует динамику воздействия звука и наличие или отсутствие шумовой опасности для человека.

Возникает проблема: можно ли количественно определить параметры тех звуков, которые превышают (или, наоборот, не превышают) установленную громкость? Решение проблемы будет способствовать разработке экологических мер по защите человека и окружающей среды от разрушающего влияния звука и шума.

■ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Биофизической основой психофизических механизмов морфофункциональной природы звуковых эффектов является закон Вебера [2]. На его основе устанавливается Вебера—Овчинникова [3, 4], который позволяет определить громкость тонов произвольных частот и интенсивностей как связь между реальной силой раздражителя, — уровнем интенсивности звука $L = \log(I/I_o)$, B_A , интенсивности I произвольной частоты f , Гц (или ее аналога — уровня частоты $F = \log(f/f_{mo})$, бел частоты, B_F), относительно пороговой интенсивности $I_o = 10^{-12}$ Дж (м²/с) на стандартной частоте $f_c = 1$ кГц (или ее аналоге — уровне частоты $F_c = \log(f_c/f_{mo})$, бел частоты, B_F), и ее субъективным ощущением, — громкостью воспринимаемого тона E , декафон. При предельной толерантной интенсивности $I_{mo} = 10$ Дж(м²/с),

для которой $L_{mo} = \log(I_{mo}/I_o) = 13 B_A [1]$,
имеем (**рисунок 1а**: с представлением реперных плоскостей) $E(L, F) = L - L_{mo} \cdot \mathcal{E}(F)$, декафон. (1)

Поверхность уровней громкости звуков произвольных частот и интенсивностей, представляемая функцией (1), строится по типу гиперболического параболоида (**рисунок 1б**).

В уравнении (1) – частотная функция [3, 4], устанавливающая отношение энергии, приходящейся на рецептор, возбуждаемый звуком частотой F , B_F , по отношению к энергии звука стандартной частоты F_c . Она определяет долю потерь энергии на уровне интенсивности L при преобразовании звуковой энергии в слуховое ощущение и играет роль параметрической переменной величины от частоты F .

Напомним [3, 4], что уравнение (1) можно представить его инвариантом. Полагая, что $E = L = E(L, F)$ – искомая громкость с уровнем громкости $E_{mo} = L_{mo}$ на стандартной частоте,

и $E(LF) - E_{mo} \cdot \mathcal{E}(F) = L - L_{mo} \cdot \mathcal{E}(F)$, получаем функцию, обратную (1) в виде

$$L(EL) = \frac{E - E_{mo} \cdot \mathcal{E}(F)}{1 - \mathcal{E}(F)} \cdot \frac{\lg \frac{I_{nf}}{I_{oc}} - L_{mo} \mathcal{E}(F)}{1 - \mathcal{E}(F)}. \quad (2)$$

Она дает возможность решить обратную задачу: по заранее заданному уровню громкости звука, не вызывающего опасности, рассчитывать уровень интенсивности звука, не способного к деструкции структур уха. 3D поверхность функции (2) симметрична относительно биссектральной плоскости $E(L, F) = L$ (**рисунок 1в**).

Однако в акустике измерению подвергаются только частота и звуковое давление (уровень звукового давления). Соответственно этому замечанию выполним некоторые преобразования в уравнении (2). По определению, между уровнем интенсивности звука L и звуковым давлением существует связь $L = 2 \cdot \log(\Delta p / \Delta p_o)$, БА, относительно порогового значения звукового давления $\Delta p_o = 2 \cdot 10^{-5}$ Па на стандартной частоте F_c .

Тогда уравнение (2) переходит к виду

$$E(\Delta p, F) = \frac{2 \cdot \lg \frac{\Delta p}{\Delta p_o} - L_{mo} \mathcal{O} \mathcal{E}(F)}{1 - \mathcal{O} \mathcal{E}(F)}. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет поставить и решить новую задачу по определению давления звука заданной частоты, которая может реализовать установленную громкость тона. Это открывает возможность решения многих других практических задач в разных сферах деятельности человека. Легко показать, что для (3) существует обратная функция

$$\lg \frac{\Delta p}{\Delta p_o} = 1/2 [E + (E_{mo} - E) \mathcal{O} \mathcal{E}(F)]. \quad (4)$$

или

$$L(\Delta p, F) = 1/2 [E + (E_{mo} - E) \mathcal{O} \mathcal{E}(F)]. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) – инварианты обратного закона Вебера – Овчинникова, – инварианты для давления

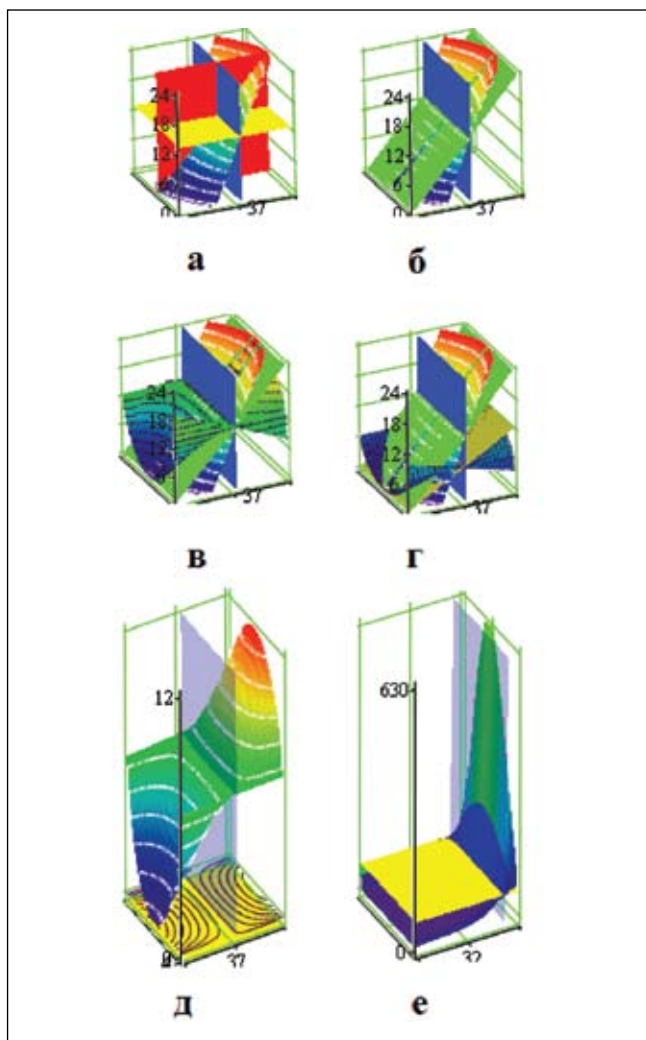


Рисунок 1а – поверхность Вебера с реперными плоскостями; **б** – поверхность Вебера с дополнительной биссектральной плоскостью; **в** – графическое представление обратного закона Вебера – Овчинникова для звукового давления; **г** – графическое представление уравнения (5); **д** – расчет звуковых давлений со звуковыми изобарами; **е** – то же для всего диапазона звуковых давлений.

звука (уровней давления звука). Их био- и психофизический смысл заключается в том, что они определяют то звуковое давление (уровень звукового давления) заданной частоты, которому соответствует достигнутая громкость установленного тона. 3D поверхность функции (5) в сравнении с (1) представлена на **рисунке 1в**. Полная графическая картина функции (5) показана на **рисунке 1г**.

Последнее выражение, как трансцендентная функция от (1), открывает доступ к расчету давления (как амплитудного, так и эффективного значения) для указанных условий. Несмотря на такую возможность (**рисунок 1д**, с линиями уровней равных давлений – звуковыми изобарами), из-за крайне большого диапазона воспринимаемых человеком величин давлений, его использование малопродуктивно (**рисунок 1е**).

Поверхности, описываемые уравнениями (1) и (5), для неразрушающих давлений [1] ($L_{\Delta p} \leq 75 \text{ dB}_{\Delta p}$) вместе с картами равных уровней, – изофонами и звуковыми изобарами, – представлены на **рисунках 2а, б**. Отдельно показана поверхность уровней давлений со звуковыми

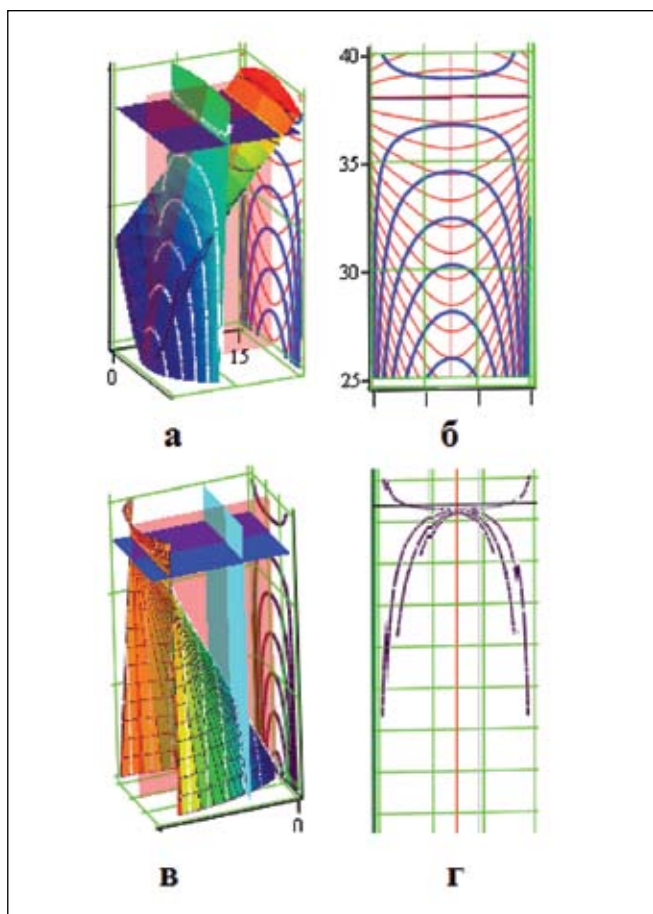


Рисунок 2а – поверхности, соответствующие прямому и обратному законам Вебера – Овчинникова для неразрушающих давлений ($L_{\Delta p} \leq 75$ дБ); **б** – карты равных уровней для этих поверхностей (красные линии – изофоны, синие – изобары); **в** – поверхность уровней давлений со звуковыми изобарами; **г** – звуковые изобары как кривые поправок для расчета критических давлений.

изобарами (**рисунок 2в**). Если звуковые изобары свести к нулевой (**рисунок 2г**), то можно получить кривые поправок, которые используются при расчетах критических давлений [5].

2. НА ПУТИ К ПРАКТИКЕ

Смысл активного мониторинга акустического пейзажа звукового поля заключается в измерении его параметров в произвольный момент времени: частоты имеющихся в нем звуков (с помощью частотомера) и их давления (с помощью измерительного микрофона). Мониторинг приобретает фактологическое значение лишь в сравнении с критическими параметрами звука, при которых не наблюдаются неблагоприятные ситуации для человека, состояния его самочувствия и здоровья.

Расчетные звуковые изобары (**рисунок 3а**) очевидно должны совпадать с уровнями белых шумов соответствующих уровней давлений. При наложении на них (**рисунок 3б**) некоторых дополнительных ограничений получается картина, которая не просто отражает существующее состояние звукового поля окружающей человека среды: мониторинг акустического пейзажа в этом случае указывает, что реальное звуковое поле не будет превосходить физиологическую (комфортную) конфигурацию [1] ($L_{\Delta p} \leq 25$ дБ): его параметры будут распо-

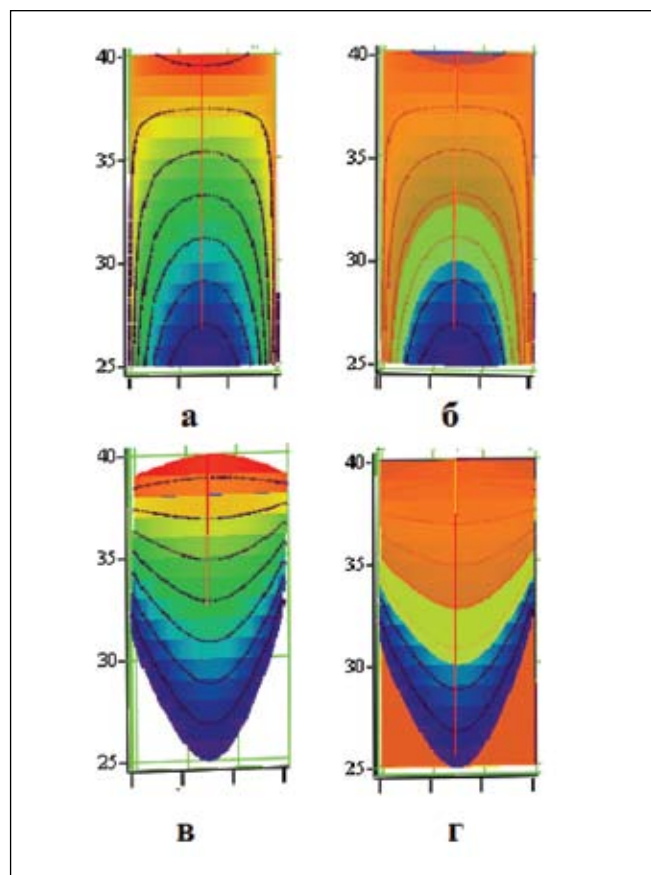


Рисунок 3а – расчетные звуковые изобары, **б** – с наложением дополнительных ограничений; **в** – поверхность Вебера с изофонами; **г** – с дополнительными ограничениями.

гаться в 3D–пространстве, не выходя за пределы темного участка внизу диаграммы. Светлый участок диаграммы покрывает параметры поля толерантных величин, для которых $25 \leq L_{\Delta p} \leq 38.5$ дБ. Если звуковое поле представлено давлениями больших величин, то оно становится опасным для здоровья человека. В этом случае параметры звукового поля оказываются в пределах красной области диаграммы. Звуки с уровнями давления $L_{\Delta p} > 75$ дБ, способные вызвать дисфункцию слухового органа и привести к разрушению его структур, располагаются в черной областиверху диаграммы [6].

Эффектно будет представляться рельеф звукового поля: визуальная картина дополнительного наложения на предложенную диаграмму спектральных линий давлений наблюдаемого звукового поля. В этом случае диаграмма может установить не только превышение давления звукового поля (если оно существует), но и те частоты, на которых это превышение давления обнаружено. Реализация этого направления видится нам весьма перспективной.

3. АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Следует заметить, что для подобных целей обоснованно использование функции (1), отражающей характер воспринимаемой человеком громкости звуков по измеренным значениям давления поля (**рисунок 3в**, с линиями равных громкостей – изофонами).

Однако при этом проведение мониторинга звукового поля будет сопряжено с дополнительными расчетами

звуковых давлений по формуле (4) или (5), поскольку измерениям подвергается именно звуковое давление.

При наложении на расчетную карту изофонов дополнительных ограничений (**рисунок 3г**) получается диаграмма, которая отражает существующее состояние звукового поля. Мониторинг акустического пейзажа в этом случае будет указывать, что звуковое поле с подпороговыми давлениями располагается на 3D-диаграмме в красной области внизу диаграммы. Если уровни давления поля не превосходят физиологическую (комфортную) конфигурацию, то его параметры располагаются на 3D-диаграмме, не выходя за пределы темного участка внизу диаграммы. Светлый участок диаграммы покрывает параметры поля толерантных величин. Если звуковое поле представлено давлениями больших вели-

чин, то его параметры оказываются в пределах красной области диаграммы, а если они способны к деструкции структур внутреннего уха, то в темной областиверху диаграммы.

■ ВЫВОДЫ

Мы показали, что закон Вебера—Овчинникова как в форме (1), так и в форме (5) может служить для анализа акустического пейзажа звукового поля среды обитания человека. Его можно использовать в качестве мониторинг-контроля шумового рельефа застроек любого типа, автотрасс, в быту. Его использование продуктивно для расчета параметров звукового поля при проектировании и строительстве гражданских и промышленных объектов. ■

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ovchinnikov EL, Ivanov VV, Ovchinnikova YuV. Real human hearing: damage detection and monitoring of the treatment effectiveness. *Trans Tech Publ. Key Engineering Materials*, 2013:569—570, 997—1004.
2. Weber EH. De Pulsu, Resorptione, Auditu et Tactu. *Annotationes Anatomicae et Physiologicae. Lipsiae: CF Kohler*, 1834.
3. Овчинников Е.Л. Громкость звуков различных частот и интенсивностей: обобщенный закон Вебера для слуха. *Наука и инновации в медицине*. 2016;(1):14—18. [Ovchinnikov EL. Loudness of sounds of different frequency and intensity: the generalized Weber law for hearing. *Nauka i innovacii v medicine*. 2016;(1):14—18. (In Russ.)].

4. Яшин С.С., Ширьязданов Р.У., Колдомасов И.В., Тарасенко Д.С., Давыдкин-Гогель М.М., Дроб В.В. Закон Вебера – Овчинникова. *Научный диалог: Вопросы медицины*. Самара, 2016:32—40. [Yashin SS, Shiryazdanov RU, Koldomasov IV, Tarasenko DS, Davydkin-Gogel MM, Drob VV. *Zakon Vebera – Ovchinnikova. Nauchnyj dialog: Voprosy mediciny*. Samara, 2016: 32-40. (In Russ.)].
5. Chedd G. Sound. From communication to noise pollution. Garden City, NY. Doubleday and Co., Inc. 1970.
6. Ovchinnikov EL, Ivanov VV. Theoretical basis of comfortable, tolerable and destructive effects of sounds and noise. *J. of Physics: CS*. 2011;(V305):10. doi: 10.1088/1742-6596/305/1/012128.

■ Участие авторов

Концепция и дизайн исследования, редактирование: Овчинников Е.Л.

Биофизическое моделирование: Овчинников Е.Л., Яшин С.С.

Клиническая интерпретация: Минаева Т.И.

Написание текста: Овчинников Е.Л., Яшин С.С.

Конфликт интересов отсутствует.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Овчинников Е.Л. – к.б.н., доцент кафедры медицинской физики, математики и информатики СамГМУ.
E-mail: E.L.Ovchinnikov@ya.ru

Яшин С.С. – студент V курса лечебного факультета СамГМУ.
E-mail: yashinss@rambler.ru

Минаева Т.И. – врач-оториноларинголог Клиник СамГМУ.
E-mail: galla15@rambler.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ovchinnikov EL – PhD, associate professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics of Samara State Medical University.
E-mail: E.L.Ovchinnikov@ya.ru

Yashin SS – 5th-year student of the Department of general medicine of Samara State Medical University.
E-mail: yashinss@rambler.ru

Minaeva TI – otorhinolaryngologist of Samara State Medical University Clinics.
E-mail: galla15@rambler.ru

■ Контактная информация

Яшин Сергей Сергеевич

Адрес: ул. Пугачевский тракт, 59, кв. 176, Самара, Россия, 443101.
E-mail: yashinss@rambler.ru
Телефон: + 7 (927) 739 42 10.

■ Contact information

Yashin Sergey Sergeevich

Address: 59 Pugachevskiy tract, ap. 176, Samara, Russia, 443101.
E-mail: yashinss@rambler.ru
Phone: + 7 (927) 739 42 10.