

УДК 620.171.2:620.179.18:624.154.1:550.8.052

В.В. Капустин¹, А.А. Чуркин²**ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ АТТРИБУТОВ
АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНТАКТА СВАИ
С ВМЕЩАЮЩИМИ ГРУНТАМИ**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1
ООО «ЭГЕОС», 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, вл. 8, стр. 3

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1
LLC "AIGEOS", 117198, Moscow, Mikluho-Maklaya St., Bld. 8, Pde 3

Поверхностный сейсмоакустический метод — один из наиболее часто используемых геофизических методов для контроля за качеством свайных фундаментов. Анализ данных, полученных этим методом в частотной области, позволяет получить дополнительную информацию об изучаемом фундаменте. Авторы предлагают методику оценки контакта свай с вмещающими грунтами на основании анализа динамических атрибутов частотного отклика свай на ударное воздействие. Качественные выводы, получаемые с использованием предложенной методики, могут быть использованы для оценки состояния сооружения и планирования прямых испытаний по определению несущей способности свай.

Ключевые слова: испытания свай, дефектоскопия, сейсмоакустический метод, метод переходной характеристики, акустическое излучение, акустический контакт, несущая способность.

The low-strain impact method is one of the most commonly used non-destructive geophysical methods in pile integrity testing. Data analysis of the low-strain method in the frequency domain allows the researcher to get additional information about the studied foundation. The authors of the article propose a methodology for assessing the contact of piles with soils based on an analysis of the dynamic attributes of the frequency response. Conclusions drawn from using the above-described method can be used by engineers to study piles quality and to plan direct static load tests to determine the bearing capacity of piles.

Key words: pile testing, defectoscopy, low strain impact method, transient response method, acoustic emission, acoustic contact, bearing capacity.

Введение. Поверхностный сейсмоакустический метод (low strain impact method) — один из наиболее распространенных и признанных методов контроля за длиной и сплошностью железобетонных свайных фундаментов. Большой объем работ, высокая производительность, включение в нормативные документы и регламенты позволяют собирать и систематизировать большие массивы данных [Капустин и др., 2018].

Анализ материалов сейсмоакустического метода контроля за качеством свай можно проводить как во временной, так и в частотной области в зависимости от типа свай и инженерно-геологических условий, в которых они находятся. Большой интерес при изучении параметров отклика свай на акустическое воздействие представляет возможность качественной оценки контактных условий свай и вмещающего грунта. Наиболее простой способ оценить контактные условия свая—грунт — найти отношение входного сигнала к наблюдаемому отклику, который можно охарактеризовать набором динамических атрибутов.

Основанная на подобных соображениях и широко известная за рубежом методика устойчивого частотного отклика (steady-state frequency response) появилась практически одновременно с поверхностным сейсмоакустическим методом и опиралась на использование явления акустического резонанса для получения сведений о состоянии свай [Amir, 2017]. Первоначально главной проблемой при проведении работ этим методом была необходимость использовать вибрационный источник для возбуждения сигнала [Davis, Dunn, 1974]. Модификация методики, позволившая анализировать резонансные явления с помощью регистрации силовых параметров удара одновременно с откликом исследуемой конструкции, получила название метода переходной характеристики (transient response method, TRM) [Liang, Beim 2008].

Материалы и методы исследований. *Связь контактных условий в системе свая—грунт с несущей способностью свай.* Несущая способность свай определяется в основном тремя параметрами: прочностью тела свай, несущей способностью

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, мл. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: 1391854@mail.ru

² ООО «ЭГЕОС», руководитель отдела геофизики; e-mail: chaa92@mail.ru

грунта под основанием сваи и сцеплением боковой поверхности сваи с вмещающим грунтом [Fleming et al., 2008]. Первый параметр определяется свойствами используемой бетонной смеси и геометрическими параметрами конструкции и связан с сплошностью сваи, качественную оценку которой дает стандартная методика сейсмоакустического метода. Два других параметра непосредственно зависят от состояния контакта сваи с вмещающими грунтами, несущая способность которых определялась в ходе предшествующих инженерно-геологических изысканий.

При известном соотношении упругих свойств грунта и сваи контакт между телом сваи и вмещающими грунтами — следующий параметр, определяющий величину акустической энергии, излучаемой во внешнее пространство. Оценка величины излучения можно получить с использованием динамических атрибутов возбуждаемого в свае акустического сигнала. Это позволяет проводить сравнительный анализ излучения свай в грунт для изучаемого свайного поля по отношению к тем сваям, несущая способность которых определялась прямым методом.

На возможность и достоверность сравнительного анализа непосредственно влияют следующие обстоятельства:

- сравниваемые сваи должны иметь одинаковую конструкцию, класс бетона, длину и диаметр;
- сваи должны находиться в одинаковых инженерно-геологических условиях;
- сваи не должны иметь нарушений сплошности, иначе их следует рассматривать отдельно.

Важно понимать, что сделать количественные выводы о несущей способности сваи по данным поверхностного сейсмоакустического метода нельзя, но качественная сравнительная оценка контактных условий может дать полезную информацию о несущей способности исследуемой конструкции.

Метод устойчивого частотного отклика. Идея метода состоит в попытке получить частотную характеристику для системы свая—грунт. При этом регистрируемая поверхностным датчиком велосиграмма считается «ответом» на импульс, силовая характеристика которого измеряется с использованием датчика, установленного на ударном источнике, и используется для «нормировки» полученного отклика (рис. 1). Поведение частотной характеристики определяется как наносимым ударом по свае, так и множеством факторов, которые вместе определяют характер взаимодействия сваи с грунтом (длина и сплошность сваи, жесткость контакта и изменения во вмещающих грунтах).

В качестве параметра, характеризующего взаимодействие сваи с грунтом, используется мобильность (mobility, также называемая спектром механического адмиттанса) — параметр, представляющий собой отношение спектров колебательной

скорости и силы наносимого удара. Полученный спектр мобильности анализируется на предмет наличия пиков, связываемых с резонансными частотами. В отличие от вибрационного метода, в котором предполагалось последовательно возбуждать в свае колебания разной частоты с помощью вибратора, для выделения резонансных частот из сигнала используется спектр ударного импульса, содержащий частоты в широком диапазоне.

Связь между расстоянием между резонансными пиками и параметрами сваи описывается с помощью дисперсионного уравнения для тонкого стержня [Капустин, 2011]:

$$\Delta f = \frac{vn}{2L},$$

где v — скорость продольной волны, L — длина сваи, $n = 1, 2, 3, \dots$. Согласно данным работы [Davis, Dunn, 1974], в предельном случае идеально жестко опирающейся на торец сваи с отсутствующим боковым трением возможно наличие резонансного пика на $v/4L$, а в случае свободного опирания аналогичной сваи на подвижное основание — и еще более низкой резонансной частоты.

Полученный спектр мобильности применяется для получения двух атрибутов, используемых для качественной характеристики системы свая—грунт. Это «динамическая жесткость» D (dynamic stiffness) и «механический адмиттанс» N (mechanical admittance):

$$D = \frac{2\pi f_m}{M},$$

$$N = \sqrt{PQ},$$

где M — значение мобильности для частоты f_m (рис. 1), P и Q — наибольшее и наименьшее значения мобильности в наблюдаемом частотном диапазоне соответственно. Динамическая жесткость — параметр, связанный с поведением низкочастотной части спектра мобильности и чувствительный к состоянию контакта основания сваи; механический адмиттанс обратно пропорционален импедансу сваи и при неизменности ее сечения и свойств материала: $N \approx 1$ [Jianlei, Meng, 2015].

На практике использование метода с целью получения качественной информации о контактных условиях сваи (а не только информации о ее длине) сталкивается с множеством проблем. Результаты численного моделирования показывают, что как только система свая—грунт начинает отклоняться от идеального случая «тонкого стержня в однородном полупространстве», увеличивается и неоднозначность интерпретации данных [Liang, Beim, 2008]. Периодически предпринимаются попытки доработать методику проведения испытаний и используемый аппаратный комплекс, корректно определить разрешающую способность метода и провести корреляцию основных анали-

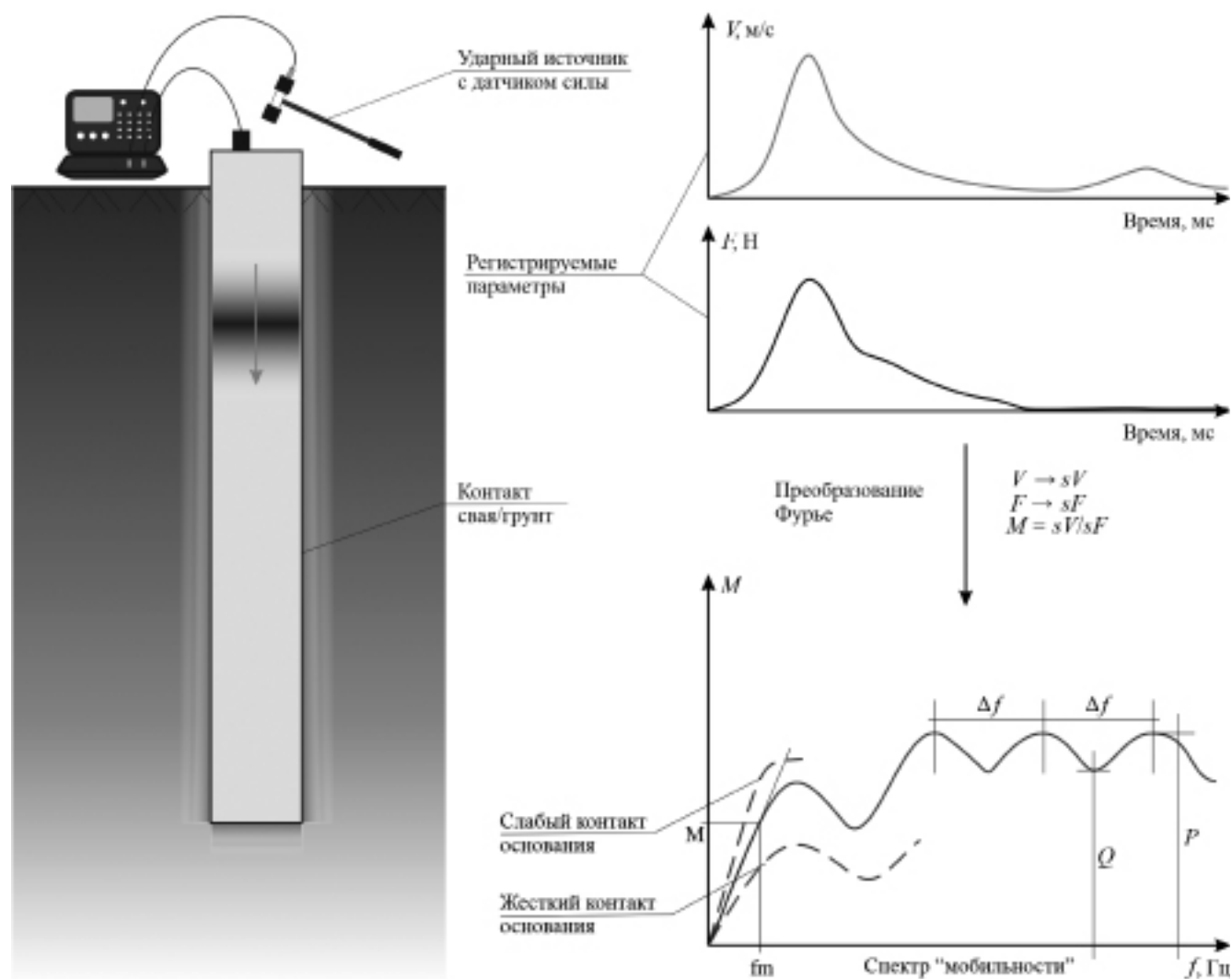


Рис. 1. Схема проведения испытания и анализ регистрируемых данных для метода устойчивого частотного отклика. Буквенные обозначения см. в тексте

зируемых атрибутов с различными параметрами исследуемого фундамента [Rausche et al., 1991; Jianlei, Meng, 2015].

Метод оценки акустического излучения свай.

При отсутствии возможности измерить характеристики ударного воздействия на сваю можно использовать следующий метод, основанный на оценке способности сваи к излучению акустической энергии во вмещающий грунт.

Излучающая способность сваи определяется значениями коэффициента отражения (прохождения) от лобовой и боковой поверхностей сваи и состоянием контакта свая—грунт. При возбуждении акустических колебаний ударным способом в свае распространяются волны различных типов. Рассмотрим волны двух типов: плоские продольные волны и волны, имеющие две составляющие (продольную и поперечную) относительно оси сваи. Для осесимметричной задачи измеряемая колебательная скорость V (или ускорение α) имеет две составляющие: продольную V_z (α_z) и радиальную V_r (α_r). В случае, если выполняется условие

$V_z \gg V_r$ ($\alpha_z \gg \alpha_r$), можно говорить о распространении в свае плоской продольной волны.

Именно такие волны возбуждаются резиновым, пластиковым или тяжелым металлическим молотком и используются для контроля сплошности сваи. В этом случае отраженные волны в большей степени содержат информацию о внутренних дефектах сваи (значительных изменениях сечения и неоднородностях материала). При наличии радиальной составляющей на распространение акустических волн значительно влияет состояние контакта боковой поверхности сваи и грунта. Согласно данным работы [Капустин 2011], такие волны можно возбуждать в свае легкими металлическими молотками.

Назовем акустическую трассу $V(t)$, зарегистрированную в течение временного интервала ΔT , откликом сваи на ударное воздействие. При этом необходимо, чтобы ΔT было больше, чем время прихода отраженной волны от конца сваи. Спектр Фурье трассы можно представить в виде

$$S(j\omega) = A_{\max} S_0(j\omega),$$

где $A_{\max}$ — максимальная спектральная амплитуда, $S_0(j\omega)$ — спектр трассы, нормированный по величине максимальной спектральной амплитуды.

Для идеального линейно-упругого тела при малоамплитудных динамических воздействиях $S_0(j\omega)$ не зависит от силы воздействия, а зависит только от свойств самого тела и источника сигнала. Для реальной бетонной сваи это равенство выполняется приближенно: $S_0(j\omega) \approx \text{const}$. Однако для практических целей этого бывает достаточно.

Результаты исследований и их обсуждение. Рассмотрим примеры, которые наглядно иллюстрируют указанное свойство нормированного спектра отклика (рис. 2, 3, таблица).

Значения коэффициента вариации для приведенных на рис. 3 данных о нормированной площади спектра

№ сваи	Материал ударного источника	Коэффициент вариации, %
12	молоток из твердого пластика	7
	резиновая киянка	13
	металлический молоток	3
13	молоток из твердого пластика	13
	резиновая киянка	16
	металлический молоток	8
16	молоток из твердого пластика	14
	резиновая киянка	13
	металлический молоток	5
22	молоток из твердого пластика	10
	резиновая киянка	8
	металлический молоток	6
24	молоток из твердого пластика	10
	резиновая киянка	7
	металлический молоток	19
27	молоток из твердого пластика	7
	резиновая киянка	8
	металлический молоток	8

Помимо «нормированной площади спектра» могут быть определены и другие атрибуты отклика, в частности, средневзвешенная частота; энергия сигнала, нормированная к максимальной амплитуде; отношение нормированной площади спектра к средневзвешенной частоте и некоторые другие (рис. 2, 4) — их использование позволяет численным образом анализировать свойства спектра сигналов. Подобные атрибуты используются в сейсмологии, есть и опыт успешного их применения для анализа результатов инженерно-геофизических изысканий, как сейсмоакустических, так и радиолокационных [Капустин, Сеницын 2018].

Поскольку при возбуждении в свае плоской продольной волны на ее распространение влияют в основном свойства материала сваи, то нормированный спектр отклика определяется акустической энергией, отраженной от конца сваи и от дефектов в стволе сваи. Иными словами, при отсутствии

дефектов излучение акустической энергии из сваи происходит преимущественно через ее нижний торец. Излучение через боковую поверхность в этом случае незначительно. В качестве сравнительной характеристики «излучательной» способности сваи можно выбрать площадь нормированного спектра.

На рис. 5 приведены данные о двух одинаковых сваях, находящихся в однотипных грунтовых условиях, — значения спектральных атрибутов в них принципиально не отличаются. При наличии заметного дефекта в свае возникает дополнительное излучение (так как за счет сужения или расширения поперечного сечения растет площадь контакта между свайей и вмещающими грунтами), и площадь нормированного спектра, как правило, уменьшается. Сам спектр приобретает более «изрезанный» характер: проявляются резонансные пики, которые для соседних свай, не имеющих нарушения сплошности, могут не быть ярко выраженными (примерно также в методе устойчивой частотной характеристики ведет себя адмиттанс N). На рис. 6 приведены данные, собранные для 4-х обособленных свайных фундаментов, расположенных в пределах одной рабочей площадки с постоянными геологическими условиями, — из каждого фундамента выбрали по одной свае без нарушений сплошности и по одной свае с заметными акустическими аномалиями, интерпретируемыми в качестве нарушений сплошности. На рис. 6 прослеживаются различия как в спектрах отклика, так и в нормированной площади спектра.

При возбуждении акустического сигнала, имеющего значительную поперечную составляющую, на величину излучения сваи влияют условия контакта боковой поверхности сваи. Следующие примеры показывают большую стабильность площади нормированного спектра при возбуждении плоской волны резиновой киянкой и заметное изменение от удара к удару при возбуждении источниками, создающими поперечную составляющую, — набором металлических молотков разного веса (рис. 7 и 8). Данные, приведенные на рис. 7, 8, собраны до и после испытания свай статической вдавливающей нагрузкой. Если свая № 347 не выдержала испытаний статической вдавливающей нагрузкой, то сваи № 14 и 53 выдержали их с большим запасом. По приведенным средним спектрам и значениям нормированной площади спектра нельзя сделать вывод, что статические испытания повлияли на параметры акустического отклика сваи. Однозначные выводы пока делать рано, так как вопрос о влиянии статических испытаний на отклик нуждается в сборе обширной статистики.

Большой интерес представляет корреляция значений динамических атрибутов и их поведения для разных ударных источников с показаниями метода испытаний свай на вдавливающую нагрузку, использующего принципы волновой теории удара (high-strain dynamic testing, PDA), так как

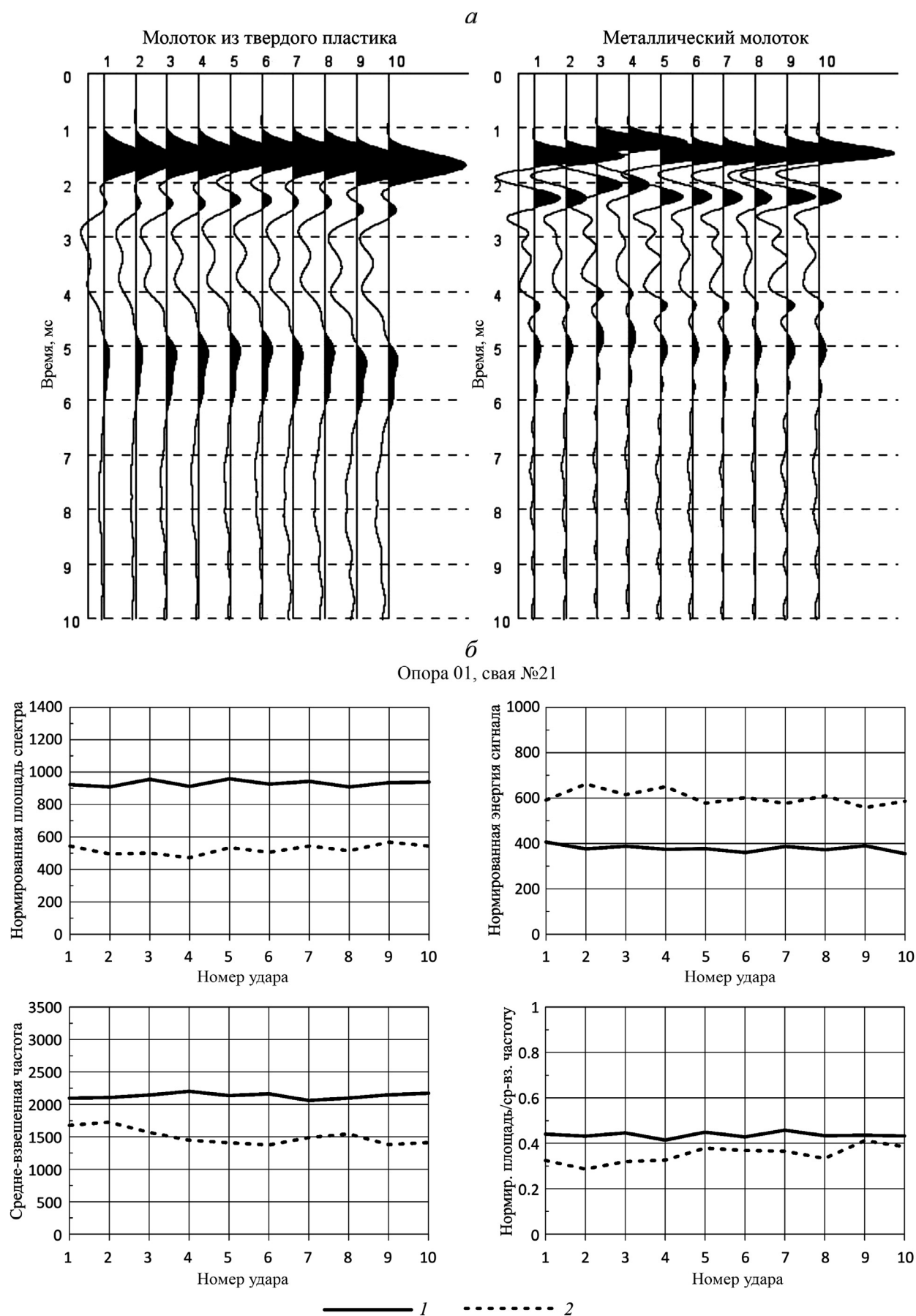


Рис. 2. Стабильность динамических атрибутов при одинаковой силе удара, сечение забивной сваи 30×30 см, длина 8 м: *a* — пример данных, *б* — изменение динамических атрибутов для двух типов ударных источников: 1 — металлический молоток, 2 — молоток из твердого пластика

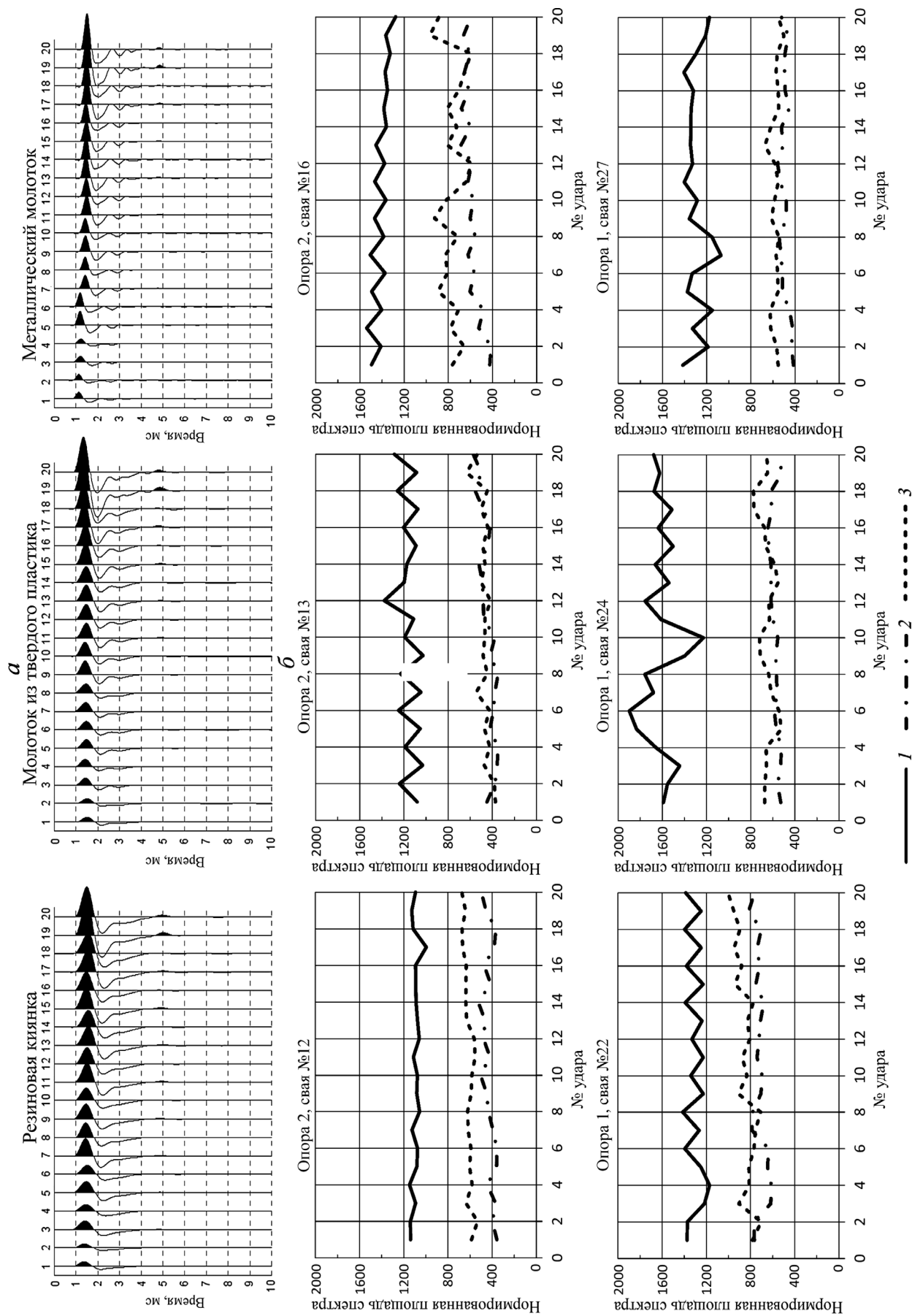


Рис. 3. Стабильность нормированной площади спектра при увеличении силы удара, сечение забивных свай 30×30 см, длина 8 м: *а* — пример данных, полученных для свай № 22, при увеличивающейся силе удара, *б* — изменение нормированной площади спектра в зависимости от силы удара для трех типов ударных источников (увеличение номера удара соответствует увеличению силы удара): 1 — металлический молоток, 2 — киянка, 3 — молоток из твердого пластика

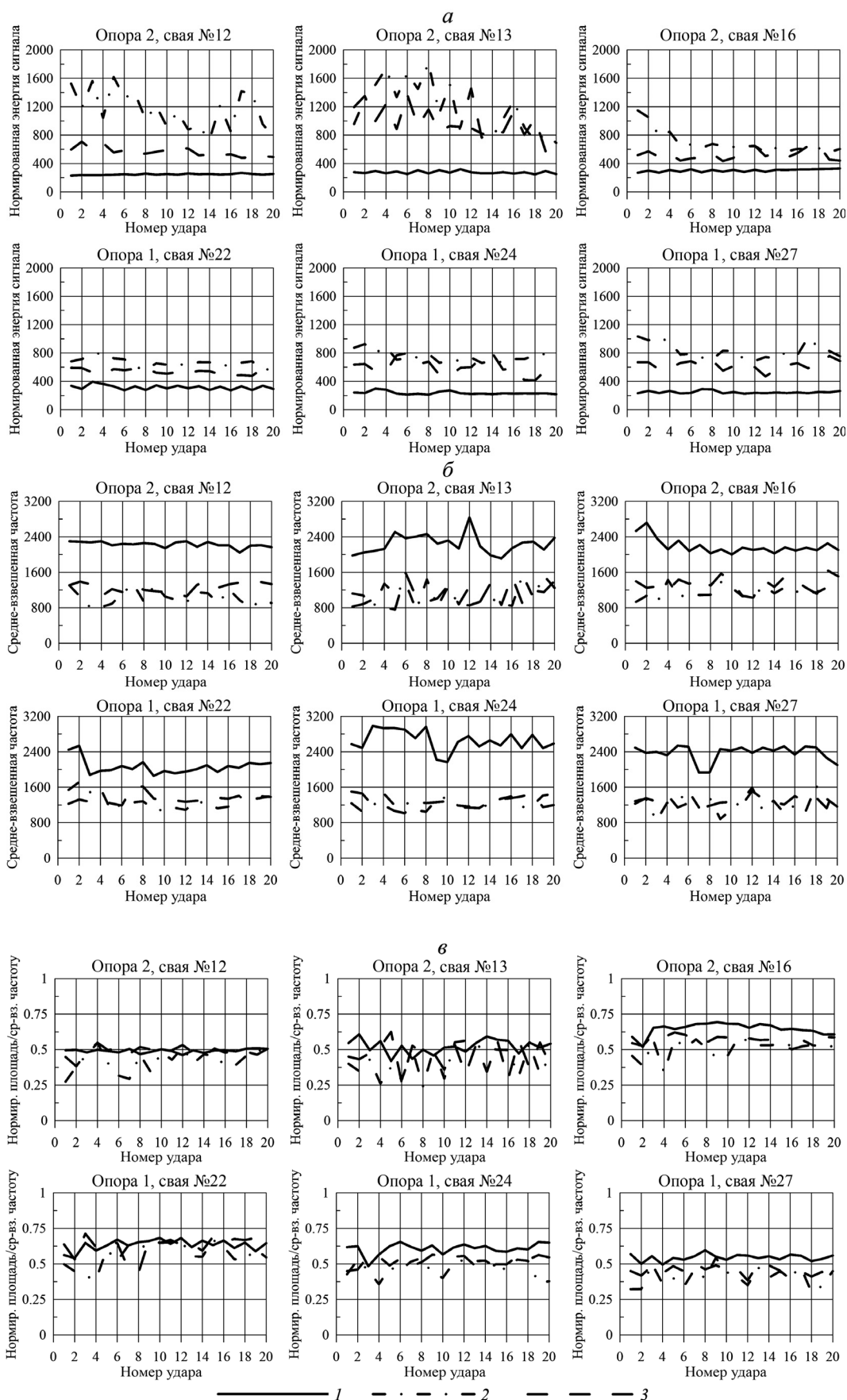


Рис. 4. Поведение динамических атрибутов для свай, описанных на рис. 3: а — нормированная к максимальной амплитуде энергия сигнала, б — средневзвешенная частота, в — отношение нормированной площади спектра к средневзвешенной частоте. Остальные условные обозначения см. на рис. 3

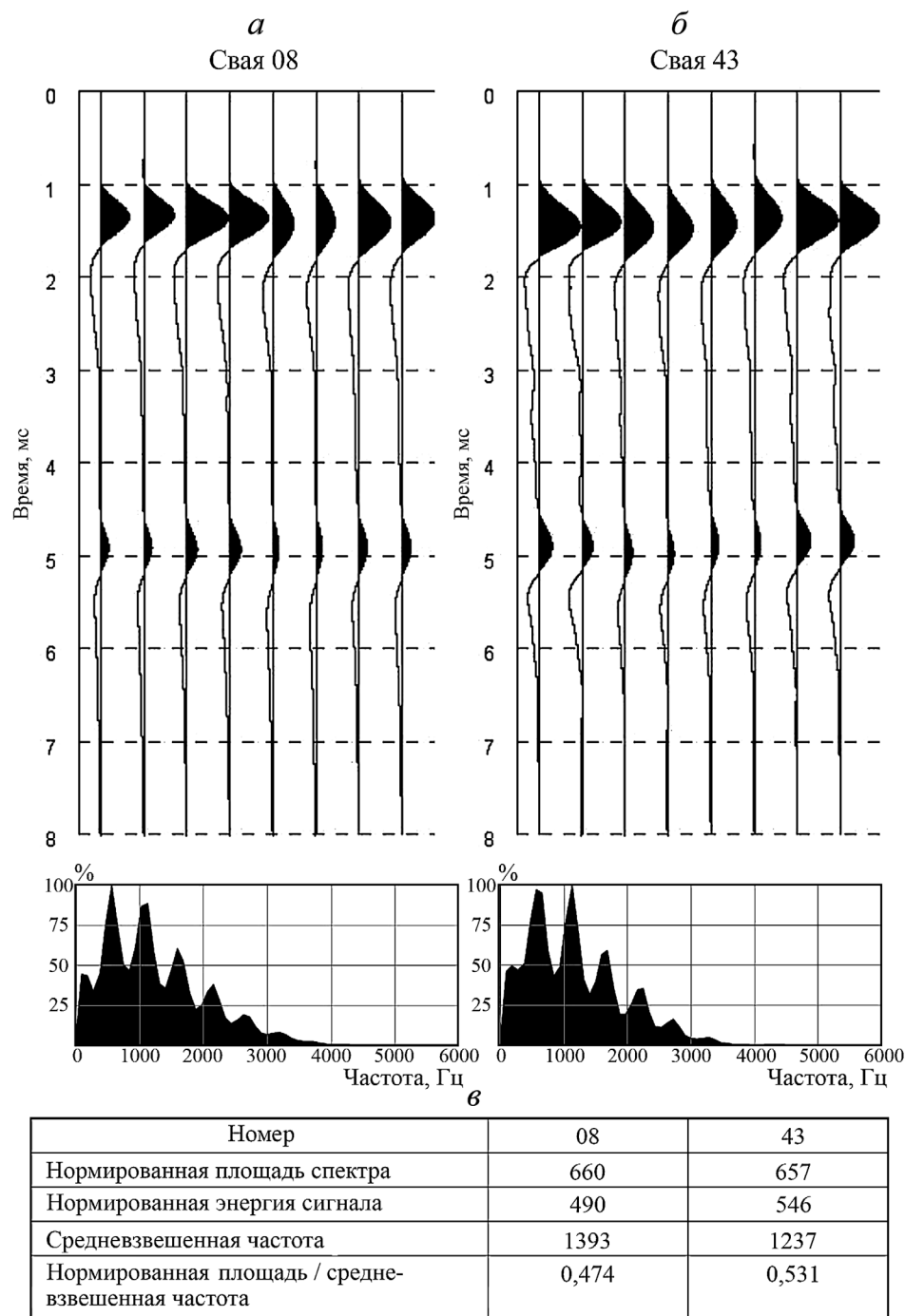


Рис. 5. Сваи диаметром 600 мм и длиной 7,4 м, бетон В25 W6 F150, вмещающие грунты — суглинки твердой консистенции, ударный источник — молоток из твердого пластика: *a* — свая 08, *б* — свая 43, *в* — значения динамических атрибутов для этих свай

этот метод испытаний позволяет разделить вклад боковой поверхности сваи и ее основания в общую несущую способность сооружения.

Выводы. 1. Плотность контакта сваи с вмещающими грунтами и плотность самих вмещающих грунтов непосредственно влияют на величину излучения энергии в грунт и, соответственно, на величину энергии отклика. Для свай, не имеющих нарушения сплошности, выполняется условие: чем хуже контакт, тем выше энергия отклика.

2. Энергия отклика сваи на акустическое воздействие снижается при наличии дефектов в свае.

3. Материал ударного источника влияет на стабильность поведения динамических атрибутов — источники из твердого пластика и резины обеспечивают более стабильное поведение атрибутов, чем металлические.

4. Использование комплекта ударных источников, создающих плоскую продольную волну, и источников, создающих волну с поперечной составляющей, позволяет лучше исследовать состояние контакта свая—грунт.

5. Способы качественной сравнительной оценки несущей способности свай ни в коем слу-

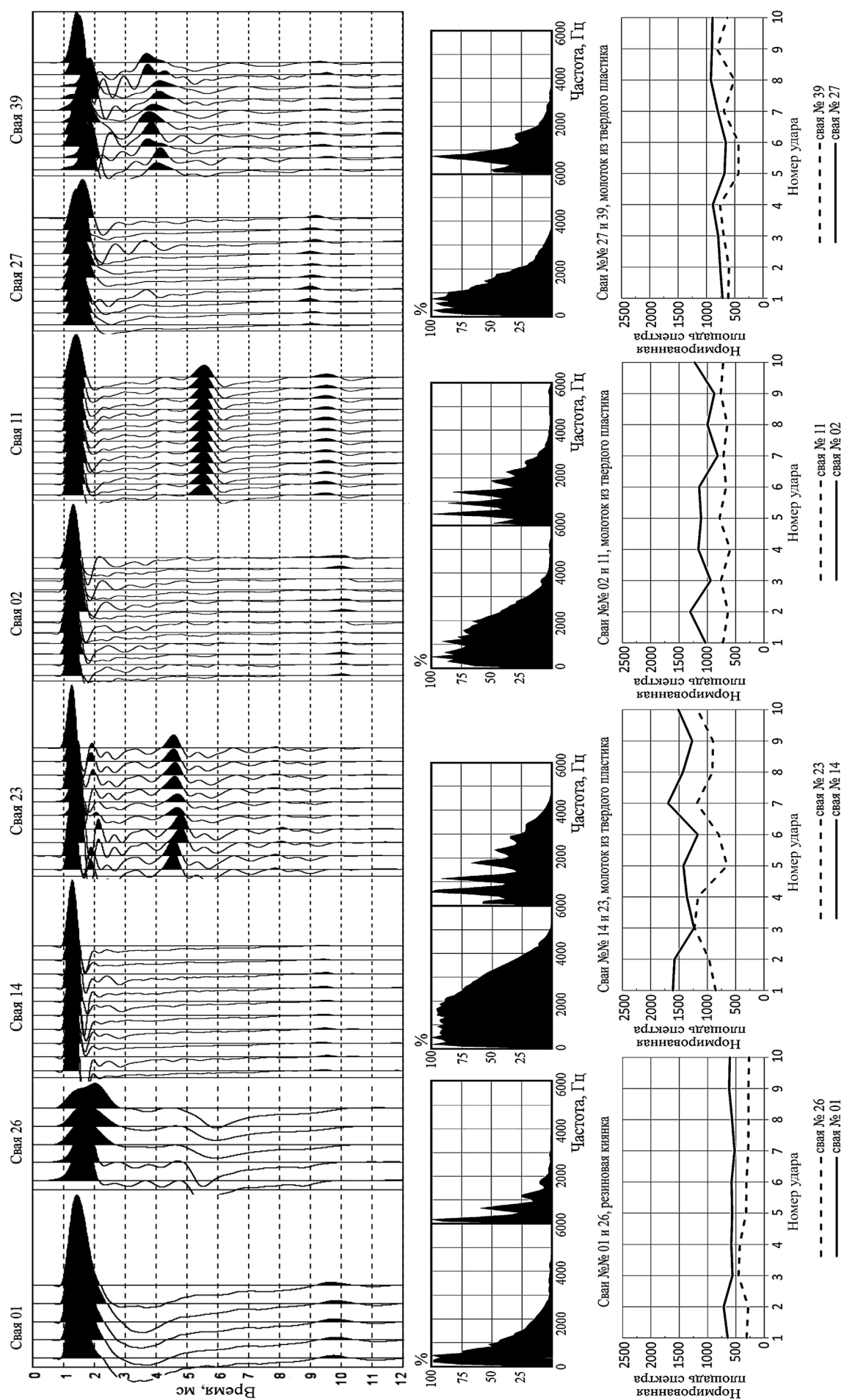


Рис. 6. Сваи диаметром 800 мм и длиной 16,0 м, бетон В25 W6 F150, вмещающие грунты — суглинки твердой консистенции и плотные пески в нижней части, ударный источник — молоток из твердого пластика или резиновая киянка. Вверху — примеры данных поверхностного сейсмоакустического метода и средние спектры для каждого набора сигналов, внизу — нормированная площадь спектра для каждой пары свай

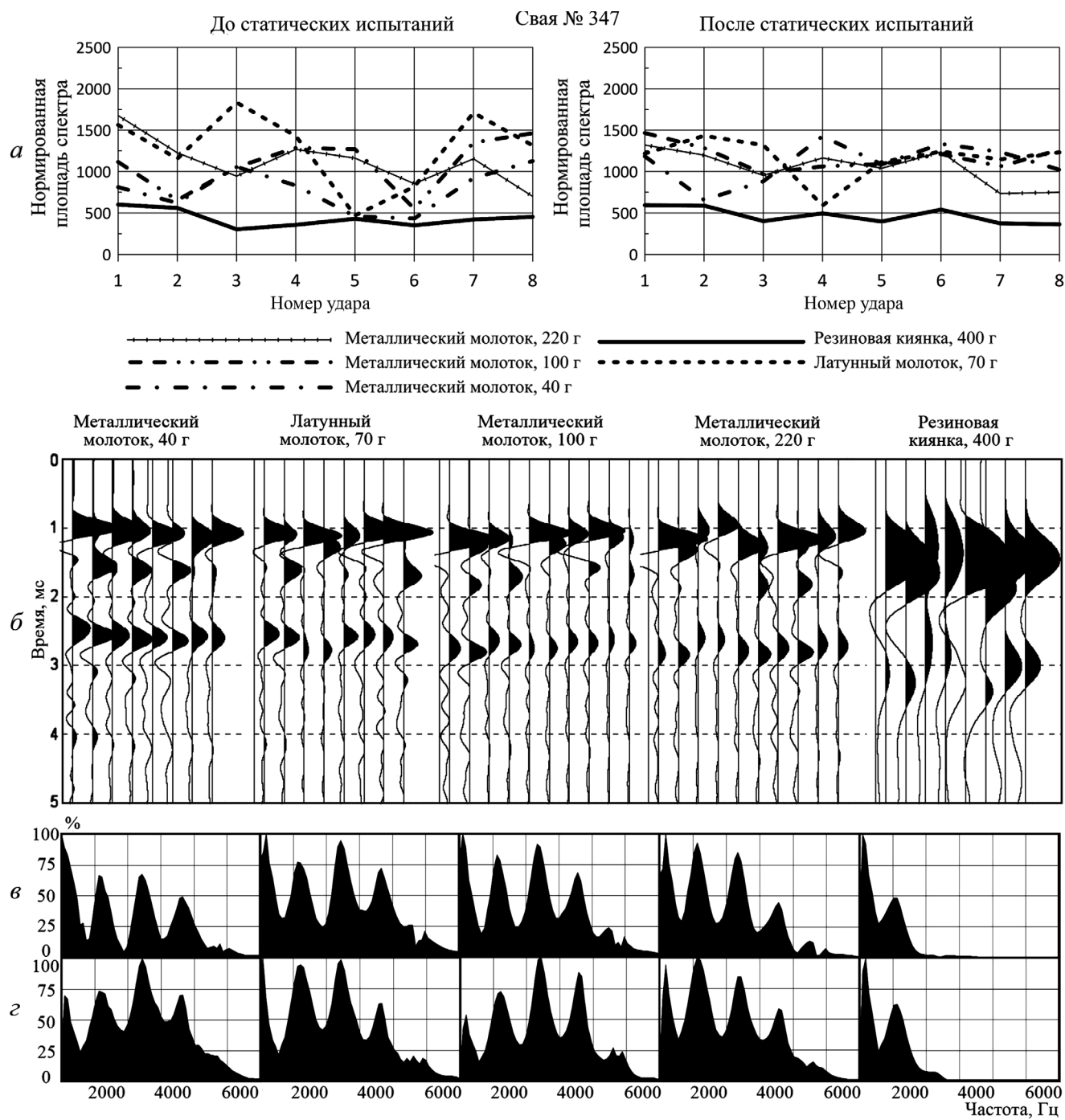


Рис. 7. Нормированная площадь спектра до и после испытания сваи статической нагрузкой, диаметр сваи 530 мм, длина 3 м, бетон В30W6F150: *a* — нормированная площадь спектра для 5 ударных источников; *b* — данные сейсмоакустического метода для сваи до испытания статической нагрузкой; *в* — нормированные спектры для данных, полученных до статических испытаний; *г* — нормированные спектры для данных, полученных после статических испытаний

чае не заменяют испытание сваи статическими и динамическими нагрузками. Благодаря высокой производительности и невысокой стоимости эти способы позволяют инженеру-испытателю получить дополнительную информацию о ситуации для всего свайного поля и целенаправленно выбирать сваи для испытания статической или динамиче-

ской нагрузкой в соответствии с поведением их акустического отклика.

Благодарности. Авторы выражают признательность генеральному директору ООО «ЭГЕОС» А.А. Мухину за предоставленную возможность использовать полевые материалы организации.

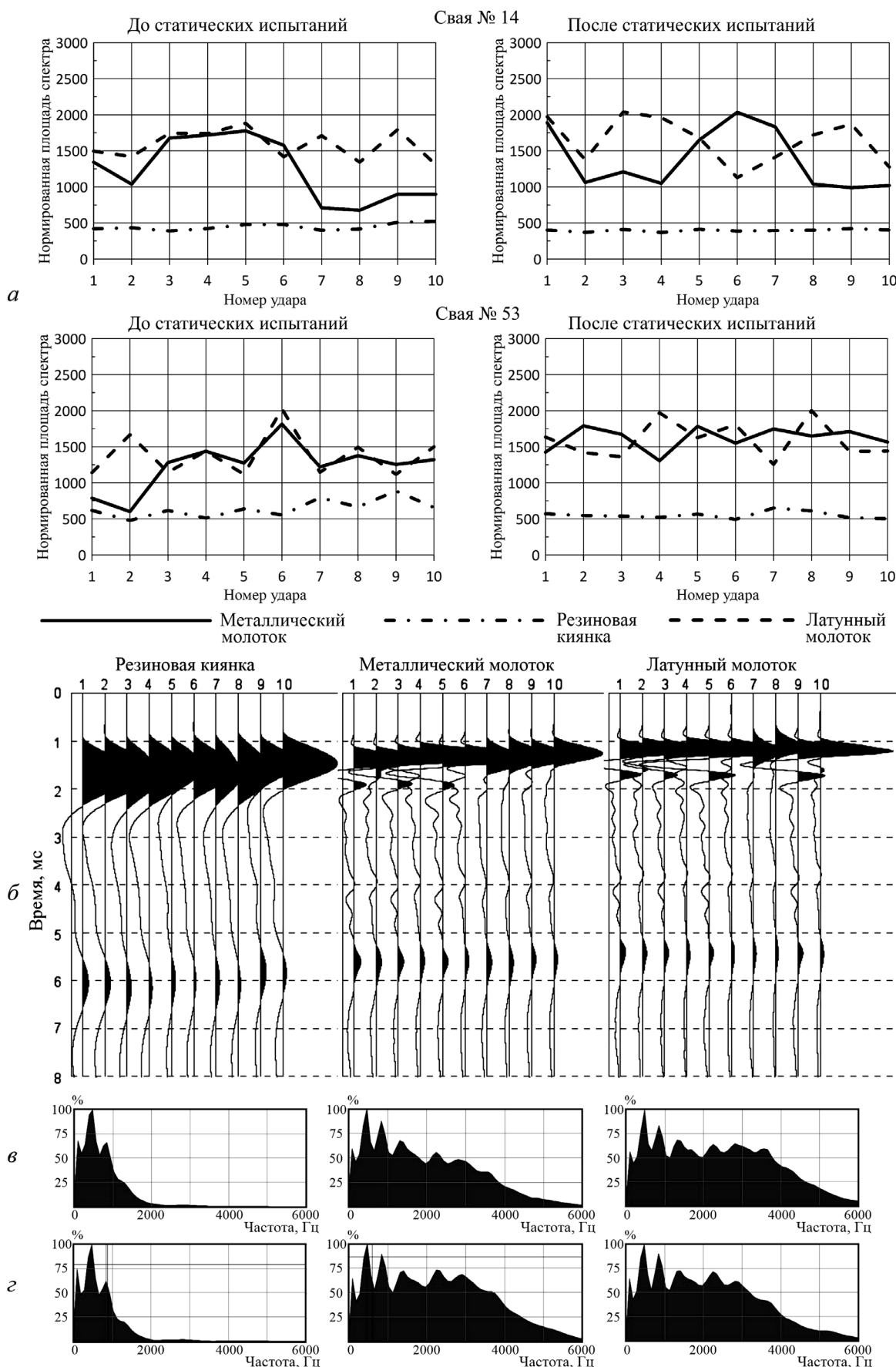


Рис. 8. Нормированная площадь спектра до и после испытания сваи статической нагрузкой, диаметр сваи 400 мм, длина 9,5 м, бетон В25: *а* — нормированная площадь спектра для свай № 14 и 53 до и после статических испытаний; *б* — данные для сваи № 14 до испытания статической нагрузкой; *в* — нормированные спектры для сваи № 14 для сигналов, полученных до статических испытаний; *г* — нормированные спектры для сваи № 14 для сигналов, полученных после статических испытаний

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капустин В.В. К вопросу о физических основах акустического метода испытания свай // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 10—15.

Капустин В.В., Сеницын А.В. Применение атрибутного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования // Геофизика. 2018. № 2. С. 17—23.

Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов // Геотехника. 2018. Т. 10. № 5—6. С. 62—71.

Amir J.M. Pile Integrity Testing: History, Present Situation and Future Agenda // Proc. 3rd Bolivian Intl. Conf. Deep Foundations. Bolivia, Santa Cruz de la Sierra. 2017.

Davis A.G., Dunn C.S. From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles // Proc. of the Institution of Civil Engineers. 1974. Vol. 57. P. 571—593.

Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. Piling Engineering. 3rd ed. // CRC Press, UK. 2008. 408 p.

Jianlei L., Meng M. Analysis of the dynamic stiffness and bearing capacity for pile foundations // Vibroengineering PROCEDIA. 2015. Vol. 5. P. 134—139.

Liang L., Beim J. Effect of soil resistance on the low strain mobility response of piles using impulse transient response method // Proc. 8th Intl. Conf on Application of Stress Wave Theory to Piling. Lisbon, 2008.

Rausche F., Shen R-K., Likins G. A comparison of Pulse Echo and Transient Response pile integrity test methods // Proceed. of the Transportation Res. Board Annual Meeting. Washington D.C., 1991.

Поступила в редакцию 12.12.2019

Поступила с доработки 15.01.2020

Принята к публикации 15.01.2020