



УДК 550.394.4

УТОЧНЕНИЕ ОЦЕНОК СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ АПРИОРНЫХ ДАННЫХ

И.Б.МОВЧАН, А.А.ЯКОВЛЕВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена аспектам представительности сейсмического микрорайонирования, являющегося одной из обязательных оценок, предвещающей гражданское и промышленное строительство. В дополнение к практикуемому подходу и в соответствии с нормативной документацией авторы предлагают параметрическое дешифрирование дистанционной основы в форме трассирования геодинамических зон и элементов геоблокового строения, где ведущим маркером сейсмогенных рискованных зон избрана аномалия пространственной изменчивости геопоя, совпадающая с дискордантным пересечением локализованных морфоструктур. Верификация этого маркера достигается за счет вывода картографического образа распределения в пределах полигона приращения сейсмической балльности, детализируемого на основании аппроксимационных зависимостей.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование; верхняя часть разреза; аппроксимация; дешифрирование; дистанционная основа; цифровая модель рельефа; геодинамическая зона

Как цитировать эту статью: Мовчан И.Б. Уточнение оценок сейсмического микрорайонирования с оптимизацией априорных данных / И.Б.Мовчан, А.А.Яковлева // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 133-141. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.133

Введение. В системе геофизических методов наблюдается выраженная специализация, позволяющая говорить, в частности, об отдельном направлении изысканий, связанном с инженерным сопровождением различного рода производственных мероприятий – от инженерно-экологических изысканий до промышленного и жилого строительства. Специфика этого инженерного геофизического сопровождения регламентируется семейством нормативных актов РСН 66-87, 64-87 (Технические требования к производству геофизических работ), которые, казалось бы, прописывают детерминированную методологию полевых и камеральных работ, а также структуру отчетного материала, следование которым должно гарантировать репрезентативность результатов и отсутствие значимых претензий со стороны внешней экспертизы. На поверку качество инженерно-геофизических работ определяется совокупностью факторов, оставляющих внешнему эксперту широкий диапазон для критики. Среди указанных факторов: ограничение оценок исследуемых объектов материалами полевых измерений при минимизации камеральной обработки; отказ от апробированного тезиса о комплексировании инструментальных определений. Например, при расчете приращения сейсмической балльности [5] по анонсируемой в нормативах формуле Медведева рассматриваются условия, далекие от резонанса слоистой толщи верхней части разреза (ВЧР) при ее возбуждении внешним сейсмогенным импульсом. Стандартная оценка сейсмогенной опасности сводится к пересчету плотности пород по системе скважин и данных малоуглубинной сейсморазведки в площадное распределение приращения сейсмической балльности ΔI . В лучшем случае эксперт наблюдает формирование карт распределения параметра ΔI , максимумы которого маркируют участки пониженной устойчивости ВЧР, а в худшем – усредненное значение приращения сейсмической балльности по всему заявленному полигону. Окончательно проблема сводится к созданию методики полевых работ и интерпретационного анализа их результатов, способных дать репрезентативную оценку локализации и количественной характеристики участков повышенного сейсмогенного риска в условиях минимального обеспечения априорной полевой информацией.

Методика работ. В рамках сформулированной проблематики наиболее эффективным считается комплекс скважинного опробования с методами полевой геофизики (малоуглубинная сейсморазведка и электротомография). В состав решаемых задач традиционно включают прослеживание кровли несущего горизонта и оценку приращения сейсмической балльности. Если первая задача связана с детерминированным структурно-вещественным комплексом, то вторая – носит прогнозный характер [1]. Последнее означает расчет параметра (здесь – ΔI), не проверяемого ни натурным опробованием горного массива, ни физико-математическим моделированием его состояния, при этом маркирующего лишь потенциальную реакцию верхней части разреза на динамические сейсмогенные и статические антропогенные нагрузки.



Фокусируясь на наиболее проблемной второй задаче, отметим ключевые методические элементы ее решения: комплект периодически обновляемых карт общего сейсмического районирования (серии ОСР), разработанных на основе методологии В.И.Уломова, В.Н.Страхова и др. [11]; нормативная документация (например, МДС 22.1-2004 «Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию...»). В основе нормативного численного пересчета, как отмечалось, лежит аналитическое соотношение Медведева

$$\Delta I = 1,67 \lg(\rho_{эм} v_{эм} / (\rho_{мек} v_{мек})), \quad (1)$$

где в числителе под логарифмом фигурирует эталонная акустическая жесткость (произведение плотности пород ρ на скорость v упругих волн в них) по данному полигону, а в знаменателе – фактическая текущая акустическая жесткость в малой окрестности инструментального опробования.

При оценке эталонных и фактических показателей акустической жесткости применима рекомендация к вычислению средневзвешенных по колонке скважины характеристик [4]:

$$\tilde{\rho v} = \sum_i \rho_i v_i \cdot h_i / \sum_i h_i,$$

где h_i – мощность i -го структурно-вещественного слоя.

Для привязки количественных оценок к геологической основе рекомендована ее актуализация на уровне обобщения архивных данных, а также тематическое дешифрирование дистанционной основы. Для компенсации приближенного характера оценок по формуле Медведева практикуется расчет синтетических акселерограмм, отражающий реакцию расслоенной толщи верхней части разреза на широкополосный сейсмогенный импульс. Операция состоит в численном решении дифференциального уравнения затухающих вынужденных гармонических колебаний

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + c \frac{d \xi}{dt} + k \xi = -m \left(\frac{d^2 \xi}{dt^2} \right)_g, \quad (2)$$

где m – масса; ξ – относительное смещение отдельного узла неравновесной модели; c – вязкое затухание; k – жесткость системы.

Решение (2) может быть найдено [13] в частотной плоскости, а также в предметной плоскости на основании численного взятия интеграла Дюамеля.

Развитие методики. С компенсацией выраженных методических недоработок связана первая часть наших изысканий. Роль тематического дешифрирования спектрозональных снимков сведена нами к прослеживанию геодинамических зон (ГДЗ) и первичному прогнозу рисков в части пониженной устойчивости ВЧР областей (возможных очагов землетрясений – ВОЗ). В качестве последних рассматриваются области пересечения (дискорданты) разноранговых ГДЗ. Параметрическое морфоструктурное дешифрирование опирается на авторскую методологию линеаментно-спектрального анализа [14, 15], где применяется спектральный канал дистанционной основы, обладающий наибольшей контрастностью для разных диапазонов поля оптической плотности (1024 градаций яркости при 16-битной кодировке; выборка диапазонов выполнена в окрестности максимумов эмпирически накопленной гистограммы распределения). По избранному спектральному каналу алгоритмически прослеживаем сгущения линейных элементов ландшафта (линеаментов), отмечающих ГДЗ, а также площадные объекты произвольной морфологии, маркирующие природно-территориальные комплексы определенного ранга, порой, сингенетичные элементам геоблокового строения.

Картирование ГДЗ укладывается в две стадии. Первая включает оцифровку поля оптической плотности наиболее контрастного спектрального канала дистанционной основы (как правило, 5-й канал, диапазон длин волн от 1,55 до 1,75 мкм). При этом реализуется выполнение по оцифрованной дистанционной основе параметрического линеаментного дешифрирования: определение позиции точек экстремума в поле оптической плотности $f(x, y)$ и в модуле его горизонтального градиента $|\vec{\nabla} f| = \sqrt{(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2}$; вращение относительно каждой точки экстремума с координатами (x_0, y_0) радиуса-вектора (элементарного линеамента) с применением матрицы поворота



$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix}.$$

Вдоль каждой точки (\tilde{x}, \tilde{y}) радиуса-вектора алгоритмически отбираются значения обрабатываемой составляющей поля оптической плотности с применением сплайн-интерполяции [7]

$$\begin{aligned} f(\tilde{x}) = & (x_{i+1} - \tilde{x})^2 (2(\tilde{x} - x_i) + h) f_i h^{-3} + (\tilde{x} - x_i)^2 (2(x_{i+1} - \tilde{x}) + h) f_{i+1} h^{-3} + \\ & + (x_{i+1} - \tilde{x})^2 (\tilde{x} - x_i) f_i h^{-2} - (\tilde{x} - x_i)^2 (\tilde{x} - x_{i+1}) f_{i+1} h^{-2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $i = \text{int}[(\tilde{x} - a)/h]$; (x_i, x_{i+1}) – координаты близрасположенных узлов матрицы поля оптической плотности; f_i и f_{i+1} – значения оптической плотности в этих узлах; f'_i и f'_{i+1} – первая производная оптической плотности в указанных узлах; $a = x_0$; h – шаг между узлами.

По выборке $f(\tilde{x})$ вдоль элементарного линеамената, отвечающей углу его поворота α , вычисляем пространственную изменчивость поля оптической плотности как функцию α , что по завершению вращения дает дисперсионный функционал. Его минимум отражает оптимальную ориентацию элементарного линеамената, совпадающую с осью доминирующего простирания геоморфологической аномалии либо с осью градиентной зоны. По точкам (x_0, y_0) сонаправленных линеаментов определяем семейство трендовых линий с окончательным вычислением точек пересечения (позиции дискордантов) данных трендов на основании теоремы Крамера и решения системы из двух линейных уравнений (для определения соотношения линейных аппроксимаций трендов).

Прослеживание ГДЗ и локализация их дискордантных пересечений верифицируются картированием геоблокового строения полигона [6]. Оно связано с выделением участков пространственной стационарности в структуре избранного спектрального канала дистанционной основы. Операция предполагает расчет радиуса автокорреляции поля оптической плотности $f(x)$ по всей площади дистанционного образа на основании структуры двумерной функции автокорреляции (АКФ). Оценка радиуса автокорреляции r по площади дает эллиптический контур, размер и ориентация которого определяют параметры скользящего интервала. Для каждой позиции последнего осуществляется вторичный отбор значения поля оптической плотности с повторным расчетом в скользящем интервале среднего радиуса автокорреляции r , играющего роль интегрального параметра изменчивости амплитудно-частотного состава дистанционной основы (компонент ландшафта) [10]:

$$r = 0,5(R(0))^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)f(x \pm \tau) dx$ – функция автокорреляции поля оптической плотности.

Границы геоблоков маркируются нами перепадом усредненного в пределах каждого геоблока параметра r , а аномальная область (пониженной устойчивости ВЧР) обозначается максимальным скачком параметра интегральной изменчивости [9] в области сочленения трех и более границ геоблоков.

Результаты параметрического дешифрирования линейных и площадных объектов с прогнозом локальных зон сейсмориска верифицируются оценкой Δl с применением аппроксимации функциональной связи между плотностью ρ рыхлых толщ и скоростью упругих волн в них (например, согласно эмпирическим зависимостям [3]). В случае скорости продольных волн V_p , измеренной в расслоенной осадочной толще,

$$\rho = \frac{V_p \cdot 10^{-3} + 6,4}{4,0}, \quad (5)$$

где $V_p = (5,45 \exp((\rho - 2,60)/2,00) \pm 0,50) \cdot 10^{-3}$; V_p – в метрах в секунду; ρ – в граммах на кубический сантиметр.

Подобный пересчет при применении формулы Медведева позволяет ограничить объем сейсмических оценок при наличии лишь данных опробования керна и наоборот. Для детализации образа пространственного распределения вычисляемого согласно (1) параметра ΔI реализуем подбор аналитической функции, отображающей функциональную зависимость между приращением сейсмической балльности и пространственным градиентом $|\vec{\nabla}H(x, y)|$ поля абсолютных высот земной поверхности:

$$\log_a \Delta I_{\Sigma} = c_i + d_i \log_a (|\vec{\nabla}H(x, y)|), \quad (6)$$

логарифмический характер которой верифицирован на нескольких опытных полигонах, отвечающих разным геоструктурной обстановке и геодинамическим позициям; коэффициенты c_i и d_i носят эмпирический характер.

Апробация методики. Работа выполнена на примере проекта индустриального парка, расположенного в потенциально сейсмоактивной зоне одного из южных регионов РФ. В окрестности полигона выделяют три структурных этажа: складчатый комплекс (триас – верхняя юра), комплекс чехла (мел – эоцен) и синорогенный альпийский комплекс (приподнятый эрозионный рельеф и синорогенные осадки олигоцена – четвертичного периода). Они сформированы в условиях цикличности трансгрессивно-регрессивной динамики, определяющей пространственно-регулярный характер сети разрывных нарушений [9]. Заложенные на первых циклах тектономагматической активизации дизъюнктивы многократно реанимировались вплоть до новейшего времени, что привело к развитию части разрывных нарушений во всех структурных этажах. В картографической плоскости полигона проявлены линейные, радиальные и кольцевые разломы, где первые обладают преимущественно северо-западным и северо-восточным простираниями, образуя квазипериодичную сеть с выраженной сдвиговой кинематикой, маркируемой системой оперяющих сигмаобразных нарушений. Радиальные и дуговые разломы приурочены к структурам центрального типа, соответствующим отрывам в обстановке растяжения.

Визуальный анализ детального дистанционного образа исследуемой территории демонстрирует развитый характер антропогенных комплексов, нивелирующих отклики от компонент природного ландшафта, что определяет первичное трассирование ГДЗ в масштабе 1:100 000 (рис.1, а). При этом геодинамические зоны преобразуются в ранжированный картографический образ, включающий кольцевые структуры, значимость которых тем выше, чем ближе центр кривизны каждой циркуидной структуры размещен по отношению к дискордантной области геодинамических зон. При ранжировании ГДЗ основным критерием избирается их длина (глубина за-

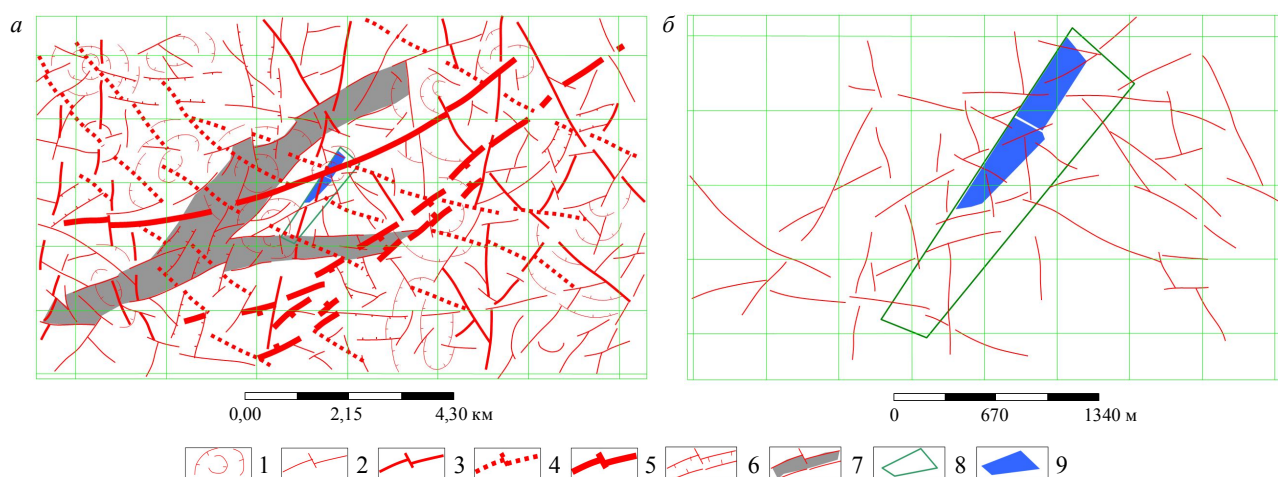


Рис. 1. Результат тематического дешифрирования дистанционной основы (ДО) и цифровой модели рельефа (ЦМР) с применением формулы (3): а – дешифрирование на региональном масштабе; б – крупномасштабное прослеживание ГДЗ
1 – кольцевые структуры; 2, 3, 4, 5, 7 – геодинамические зоны соответственно 1-, 2-, 3-, 4- и 5-го рангов; 6 – промежуточный тип геодинамических зон, организующихся в локальные полосовидные образования заданного азимута простирания; 8 – принципиальная привязка к области инженерных изысканий; 9 – контур возделываемых полей (элемент пространственной увязки разномасштабных материалов)

ложения) и степень раздробленности (возраст последней активизации). На региональном уровне выделяем пять рангов геодинамических зон, из которых первый соответствует наименее протяженным и наиболее латентным структурам, а пятый ранг – ГДЗ, в явной форме отображенным в современном ландшафте. Прогнозные области ВОЗ отвечают дискордантам [12] в южной, центральной и северной частях лицензионного контура.

При крупномасштабном дешифрировании (масштаб 1:30 000, рис.1, б) трассирование соосных структур возможно за счет анализа ландшафта территорий, прилегающих к границам исследуемого полигона. Объективность отнесения этих структур к ГДЗ обеспечивается сравнением с результатом регионального дешифрирования: области ВОЗ, выделенные на всех стадиях дешифрирования, тяготеют к одним и тем же позициям.

На этапе геоблоковой реконструкции (рис.2) применяется детальная цифровая модель рельефа земной поверхности: сложность морфоструктурного образа связывается нами с антропогенной измененностью рельефа, что частично нивелируется трассированием протяженных линейных структур. Каждой границе геоблока присваивается бергштрих, указывающий в сторону повышения степени дифференцированности рельефа. В соответствии с формулой (6) для первичного прогноза областей ВОЗ важны участки повышенной изменчивости пространственного градиента поля абсолютных высот. Уточнение их позиции реализовано при количественных оценках сейсмического микрорайонирования (СМР).

Рельеф исследуемой области – сложный по морфологии, с перепадом высот в десятки и первые сотни метров, поэтому возможны угрозы оползневого характера. Кроме того, пониженная устойчивость ВЧР к внешним нагрузкам может быть связана, во-первых, с позицией элементов разрывной тектоники, во-вторых, с уровнем обводненности толщ. Из результатов бурения (рис.3) следует, что приповерхностные структурно-вещественные комплексы сложены рыхлыми песчано-глинистыми образованиями, общая мощность которых варьирует от первых десятков сантиметров до первых метров, и подстилающими выветренными известняками.

В двух скважинах (на юге полигона) из двадцати девяти подсечено зеркало грунтовых вод на глубине $h \leq 2$ м, что дает значимое приращение сейсмической балльности в соответствии с аппроксимационной зависимостью вида (по [1])

$$\Delta I_{УГВ} = K \exp(-0,04h^2) = 0,95 \exp(-0,04(1,50)^2) = 0,87,$$

где $K = 0,95$ – эмпирический коэффициент; маркер «УГВ» обозначает поправку с учетом уровня грунтовых вод.

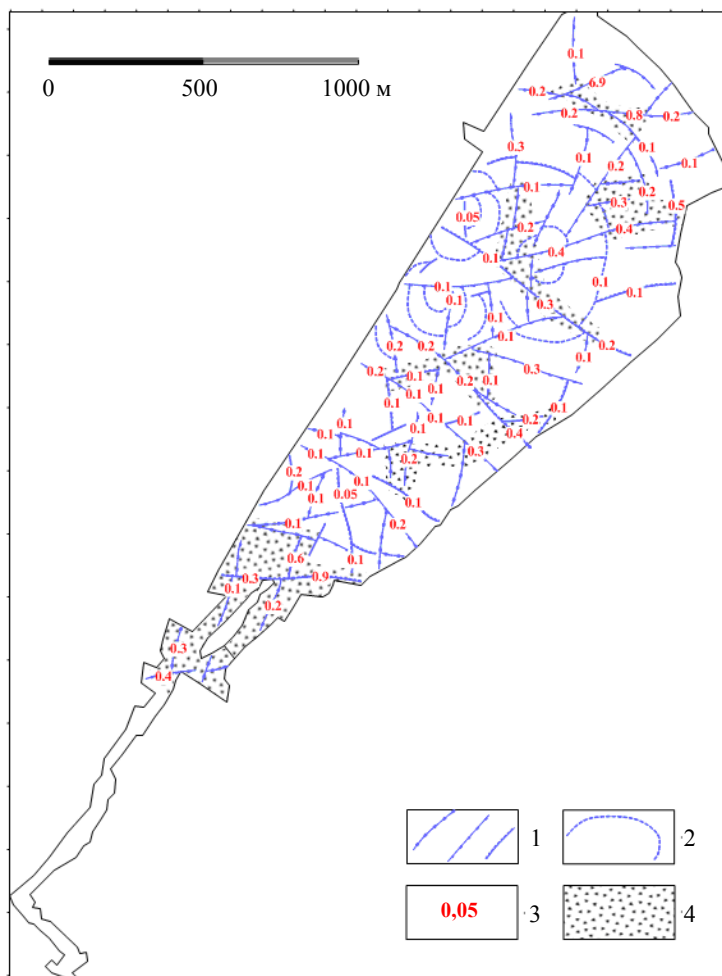


Рис.2. Результат картирования геоблоковых границ на основе формулы (4) с их ранжированием в пределах области инженерных изысканий (см. рис.1)

- 1 – границы с бергштрихами (указывают в область наибольшей изменчивости морфологии ЦМР);
- 2 – границы, отражающие верифицированные кольцевые структуры;
- 3 – нормированный перепад рельефа на геоблоковой границе;
- 4 – прогнозная область сейсмогенного риска по критерию изменчивости нормированного параметра перепада рельефа на геоблоковых границах (в 2 раза и более)

Абсолютная отметка устья: 218,4 м

a

Геологический возраст	Глубина подошвы, м	Абсолютная отметка, м	Мощность слоя, м	Литологический разрез	Описание грунтов	Появление воды, м	Установление воды, м
b Qh	0,1	218,26	0,1		Почвенно-растительный слой		
e Q	0,5	217,86	0,4		Суглинок тяжелый песчанистый Суглинок тяжелый твердый просадочный с дресвой, щебнем до 25 %, с известковистыми пятнами серый, коричневый $\rho_{\text{ср.взв}} = 1,7 \text{ г/см}^3$		Грунтовые воды не вскрыты
P2	5,0	213,36	4,5		Известняк с прослоями мергеля малопрочный, плотный размягчаемый, трещиноватый, выветрелый в кровле, серовато-белый $\rho_{\text{ср.взв}} = 2,01 \text{ г/см}^3$		

Масштаб 1:100

б Абсолютная отметка устья: 170,3 м

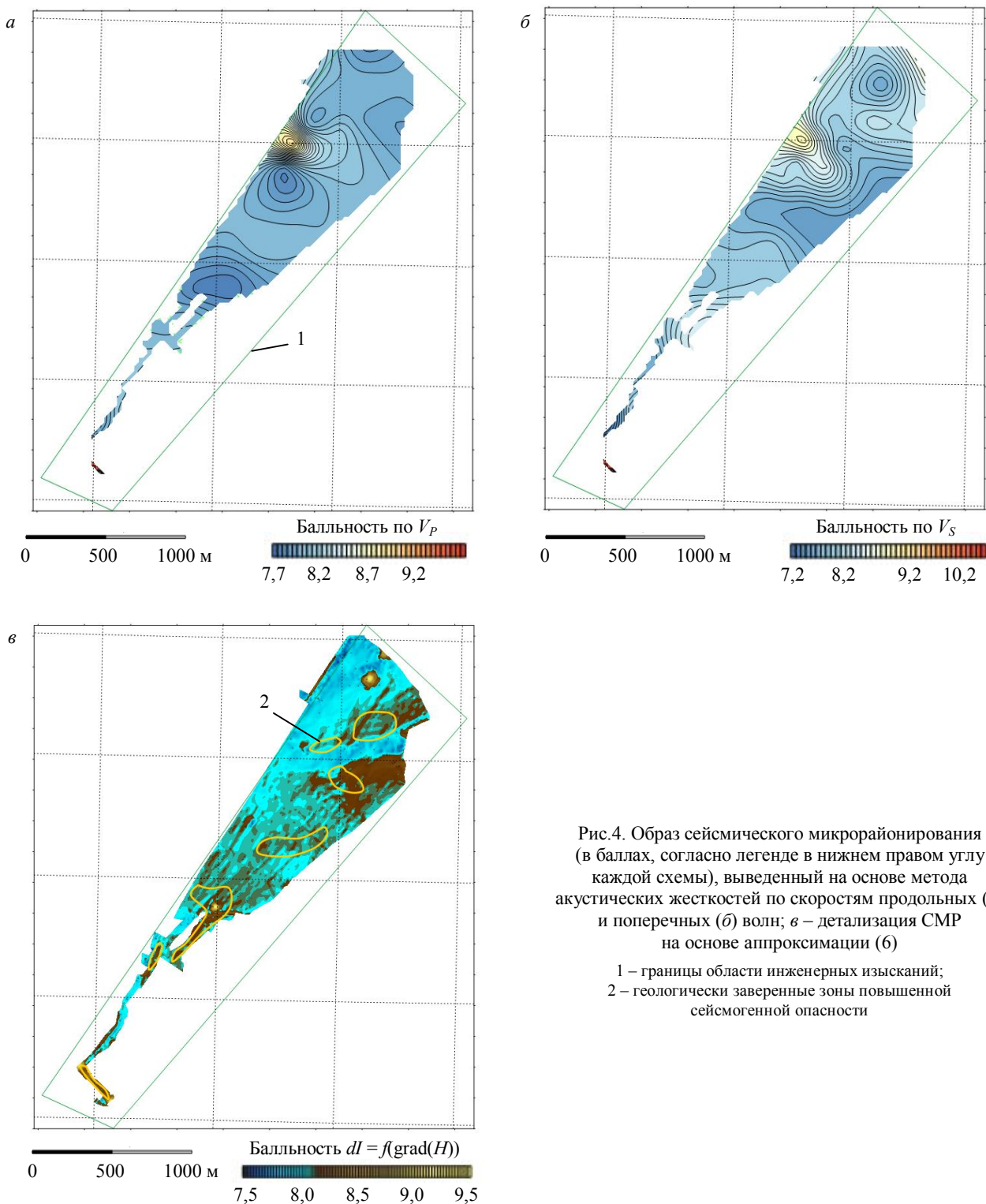
Геологический возраст	Глубина подошвы, м	Абсолютная отметка, м	Мощность слоя, м	Литологический разрез	Описание грунтов	Появление воды, м	Установление воды, м
b Qh	0,1	170,15	0,1		Почвенно-растительный слой		
t Qh	2,5	167,75	2,4		Насыпной грунт: суглинок с галькой, гравием, с прослоями песка, серо-коричневый, с примесью строительного мусора (обломки кирпича, битого стекла) $\rho_{\text{ср.взв}} = 1,68 \text{ г/см}^3$	1,5	1,6
a Qh	110				Суглинок легкий песчанистый (суглинок легкий) текучепластичный, с прослоями супеси текучей, светло-серый $\rho_{\text{ср.взв}} = 1,93 \text{ г/см}^3$		

Масштаб 1:100

Рис.3. Выдержки из результатов бурения, отражающих монотонный характер залегания пород в верхней части разреза: *a* – пример колонки до глубины 5 м по скважинам в северной и центральной частях полигона работ (грунтовые воды не вскрыты); *б* – пример колонки до глубины 11 м по скважине в южной части полигона работ (грунтовые воды залегают на глубине менее 2 м)

$\rho_{\text{ср.взв}}$ – лабораторные определения средневзвешенной плотности с верификацией по формуле (5) для отдельного слоя

В прочих скважинах грунтовые воды на десятиметровых глубинах не встречаются. Согласно рассмотренным на рис.3 примерам скважинных колонок в пределах полигона, исходная выборка формируется для средневзвешенного разреза, у которого верхний слой представляет собой суглинки с дресвой, а нижний слой – выветренный известняк. Исключение здесь представляет группа южных скважин, где верхний слой сформирован насыпными грунтами, а подстилающий субстрат представлен суглинками различной консистенции. В качестве эталонного слоя рассматриваем виртуальный структурно-вещественный комплекс, чья акустическая жесткость принимается как средневзвешенная по всем вскрытым бурением и верифицированным сейсморазведкой комплексам в пределах исследуемой территории: $(\rho V_P)_{\text{ЭТ}} = 2,28 \cdot 10^{-3} \text{ г/с}$, $(\rho V_S)_{\text{ЭТ}} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ г/с}$.



Прибавляя итоговые приращения ΔI к наивероятнейшей балльности, равной восьми (выводится из карт ОСР-2015), и переходя к пространственным распределениям, получаем систему площадных образов (рис.4, а, б). Пространственный образ СМР полигона работ, выведенный на основе скоростей поперечных волн, обладает лучшей коррелируемостью положительных экстремумов с зонами ВОЗ, локализованными на качественном уровне при анализе ДО и ЦМР, по сравнению с СМР на основе продольных волн. Районирования на основе пересчетов по продольным и поперечным скоростям верифицируют друг друга и подтверждают тезис о наибольшей значимости зон ВОЗ, размещенных в северной и в южной частях исследуемой территории. Пытаясь детализировать полученные схемы распределения сейсмической балльности, применяем аппроксимацию (б), приобретающую в нашем случае вид

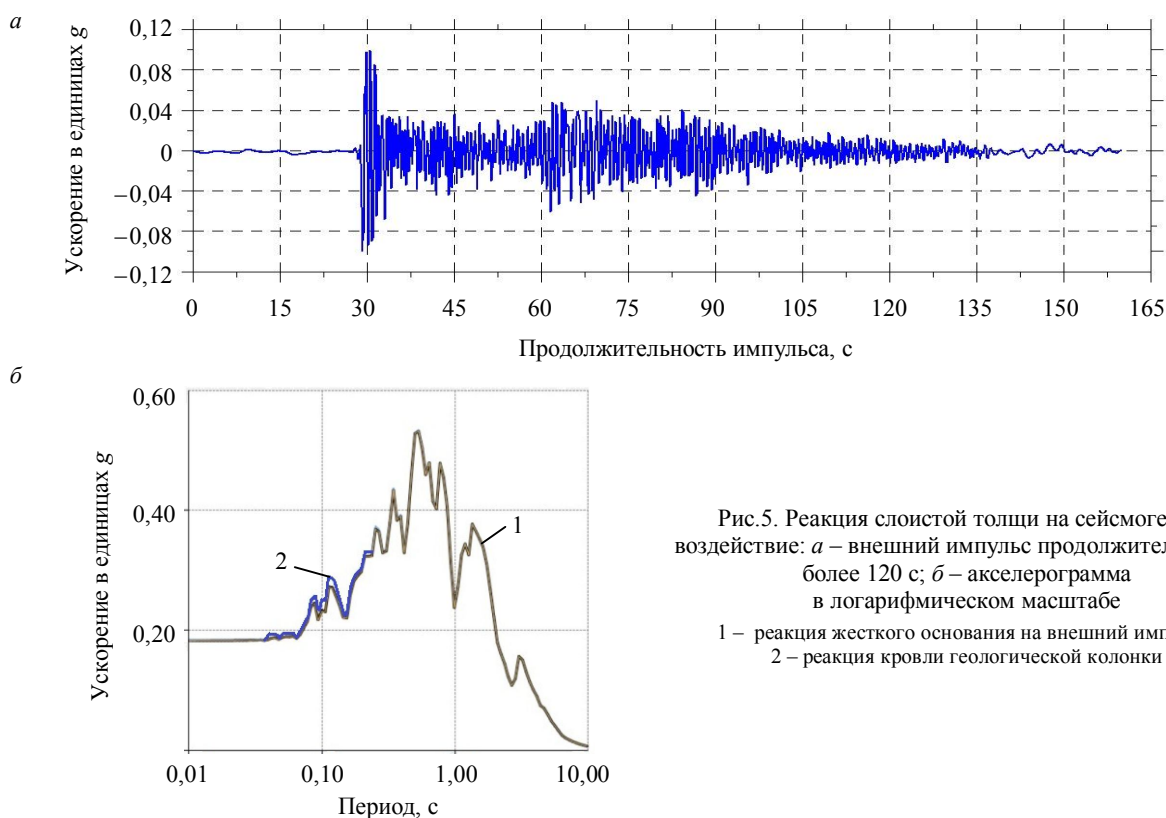


Рис.5. Реакция слоистой толщи на сейсмогенное воздействие: а – внешний импульс продолжительностью более 120 с; б – акселерограмма в логарифмическом масштабе
1 – реакция жесткого основания на внешний импульс;
2 – реакция кровли геологической колонки

$$\ln(I) = 0,02843 \ln(\sqrt{H}) + 2,16752 .$$

С точки зрения математической физики такой пересчет представляет собой не более чем нормирование поля пространственного градиента высот рельефа земной поверхности (рис.4, в). С точки зрения физики пространственный градиент этих высот связан с реакцией локального участка на эндогенное сейсмологическое воздействие: перепады высот маркируют смену нагрузки сжатия-растяжения на подстилающий геологический субстрат, а относительно крутые склоны можно считать потенциально опасными в части тангенциальных смещений грунта.

Согласно нормативным оценкам [8], балльность в пределах исследуемого объекта варьирует в диапазоне 7-8 баллов, что означает амплитуду виброускорения начального импульса порядка (0,05-0,15)g (где g – ускорение свободного падения). Продолжительность импульса в нашей модели составляет 120 с и его широкополосный состав допускает резонансное состояние слоистой геологической среды (рис.5, а).

Синтетическая акселерограмма приведена на рис.5, б, где на фоне акселерограммы первичного импульса (жирная коричневая кривая) отражен спектральный отклик от кровли каждого из породных комплексов, заложенных в исходную модель.

Очевидна малоамплитудная реакция однослойной среды, состоящая в незначительном росте виброускорения в окрестности периода от 0,1 с с превышением в максимумах не более 0,05g. В рамках таких оценок определяем периоды собственных колебаний T исследуемой упругой системы, что в первом приближении реализуется на основе соотношения вида

$$\cos(\omega h / V_s) = 0 \text{ или } T = 2\pi / \omega = 4h / (kV_s) \text{ при } k = 1; 3; 5; \dots,$$

где ω – циклическая частота, $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$; $k/4 = h / \lambda = h / (TV_s)$, нечетные значения k отвечают спектральным пикам; λ – длина волны.

Тогда для верхнего слоя период $T = 0,03; 0,016$ с и т.д. Значение периода собственных колебаний $T = 0,03$ с находится за пределами формирования пиков в спектральном отклике слоистой среды на внешнее упругое воздействие. Таким образом, можно допустить отсутствие в данном случае резонанса и корректность оценок по формуле Медведева.



Выводы представлены методической и апробационной частями:

1) нормативные количественные оценки сейсмогенного риска в области сооружения инженерных конструкций носят линейный характер, а потому не могут давать конечное представление о позиции, количественных характеристиках рискованных участков и требуют инструментальных и камеральных дополнений;

2) в инструментальной части рекомендуется обеспечивать комплексирование методов скважинного опробования и полевой геофизики (сейсмо- и электроразведки) при равномерном покрытии полигона замерами и сопровождении дистанционным зондированием с целью репрезентативного выделения участков роста сейсмической балльности и верификацией этих участков при картировании ГДЗ и зон ВОЗ;

3) при невозможности выполнения п.2 эффективным оказывается сочетание параметрического и экспертного подходов при тематическом дешифрировании дистанционной основы мелкого и крупного масштабов, а также ЦМР, нацеленном на трассирование ГДЗ, картирование элементов геоблокового строения и, окончательно, верифицированном прогнозе зон ВОЗ;

4) аппроксимационные зависимости, связанные со взаимным пересчетом плотности и скоростей упругих волн, а также вычислением сейсмической балльности на основе данных топогеодезических изысканий и глубины залегания зеркала грунтовых вод, представляют собой работоспособный инструментарий для повышения детальности СМР в условиях ограниченной выборки полевых измерений; следует обращать внимание на необходимость верифицировать эмпирические коэффициенты этих зависимостей в пределах тестовых полигонов;

5) для перспективного развития оценки резонансного отклика ВЧР на сейсмогенный импульс методику расчета синтетических акселерограмм и собственных колебаний можно дополнять применением формулы Медведева по оси глубин колонки каждой скважины, а также физико-математическим или аналоговым моделированием опасных оползневых процессов при дифференцированном рельефе или процессов гравитационного обрушения из-за закарстованности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алешин А.С.* Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 303 с.
2. *Гзовский М.В.* Математика в геотектонике. М.: Недра, 1971. 240 с.
3. *Магид М.Ш.* Петрофизическая характеристика литосферы и мантии// Петрофизика. Земная кора и мантия: Справочник / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. С. 221-225.
4. *Максимов А.Б.* О сейсмической жесткости грунтов// Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С.145-152.
5. *Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Стройиздат, 1962. 284 с.
6. *Мовчан И.Б.* Методика структурно-морфологического районирования на примере территории листа N-38 / И.Б.Мовчан, А.А.Яковлева // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2016. № 4 (118). 2016. С.167-169.
7. *Мудров А.Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках BASIC, FORTRAN и PASCAL. Томск: МП «Раско», 1992. 272 с.
8. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации: Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах / Под ред. В.И.Уломова, М.И.Богданова // Инженерные изыскания. 2016. № 7. 121 с.
9. *Петров О.В.* Прикладные аспекты теории диссипативного структурирования неравновесной геологической среды / О.В.Петров, И.Б.Мовчан // Диссипативные структуры Земли. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. С. 202-267.
10. *Серкеров С.А.* Спектральный анализ в гравиразведке и магниторазведке. М.: Недра, 1991. 279 с.
11. *Уломов В.И.* Проблема сейсмического районирования территории России / В.И.Уломов, Л.С.Шумилина. М.: Всероссийский НИИ проблем научно-технического прогресса и информации в строительстве, ВНИИТПИ Госстроя России, 1999. 42 с.
12. *Хесин Б.Э.* Интерпретация магнитных аномалий в условиях косоугольного намагничивания и пересеченного рельефа / Б.Э.Хесин, В.В.Алексеев, Х.П.Метакса. М.: Недра, 1983. 288 с.
13. *Matasovic N.* Seismic response of composite horizontally-layered soil deposit: Ph.D. Thesis / Univ.of California, LA, USA. 1993. 235 p.
14. *Movchan I.B.* Experience of qualitative and quantitative interpretation of nonpotential geofields with surface and deep morphostructural reconstructions on the example of Unica ore province (Karelyja, Russia) / I.B.Movchan, A.A.Yakovleva // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2017. Vol. 8. Iss. 12. P. 926-932.
15. *Movchan I.B.* Qualitative interpretation of remote sensing materials in environmental and geological problems / I.B.Movchan, A.A.Kirsanov, A.A.Yakovleva // World Applied Sciences Journal. 2014. 30(1). P. 39-45.

Авторы: **И.Б.Мовчан**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Movchan_IB@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **А.А.Яковлева**, канд. физ.-мат. наук, доцент, Yakovleva_AA@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 18.01.2019.

Статья принята к публикации 11.03.2019.