

РАЙОНИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОГНОЗНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ  
ТАНЛУ-КУРСКОГО ЛИНЕАМЕНТА (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК)

*В.И. Джурик<sup>1</sup>, С.П. Серебренников<sup>1</sup>, Е.В. Брыжак<sup>1,2</sup>, А.Ю. Ескин<sup>1</sup>, А.Н. Шагун<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУН Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова 128, г. Иркутск, 664033; e-mail: [Dzhurik@crust.irk.ru](mailto:Dzhurik@crust.irk.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, пр. Ленина 39, г. Якутск, 677077

Поступила в редакцию 9 сентября 2015 г.

Рассмотрены вопросы районирования сейсмической опасности в пределах активной тектонической структуры Танлу-Курского линеамента на примере участков строительства Кимкано-Сутарского ГОКа, расположенных на территории Еврейской автономной области. Наиболее сильные сейсмические события для этой зоны (магнитуда до 8.5, интенсивность сейсмических сотрясений до 12 баллов) расположены в южном фрагменте разлома (территория КНР). Интервал повторяемости событий с  $M = 8$  в южном фрагменте разлома составляет 3500 лет.

В процессе исследований реализуется подход, основанный на комплексировании расчетных и инструментальных методов, применяемых для построения карт сейсмического микрорайонирования с учетом деградации мерзлоты. Исследования в этом направлении проведены большей частью с использованием теоретических расчетов и постановкой инструментальных сейсморазведочных, электроразведочных и сейсмометрических измерений. Их задача – дифференцирование горных пород по скоростям распространения сейсмических волн, амплитудам и частоте колебаний слоев с учетом их состава и состояния. В конечном итоге именно они определяют степень проявления сейсмичности на прогнозируемые сильные землетрясения. Особое внимание уделяется количественному обоснованию проявлений прогнозной сейсмичности изучаемых площадок в зависимости от грунтовых условий в их основаниях по расчетным максимальным ускорениям. Предложен подход к обоснованию выбора исходного сигнала для реализации теоретических расчетов, результаты которых приведены для конкретных строительных площадок и представлены в виде карт-схем проявления прогнозной сейсмичности в параметрах сейсмических воздействий для исследуемых площадок. В первом приближении, на основе выбранных подходов, реализована технология построения инженерно-сейсмологического разреза по участку строительства дамбы хвостохранилища с учетом возможной деградации мерзлоты в результате строительства.

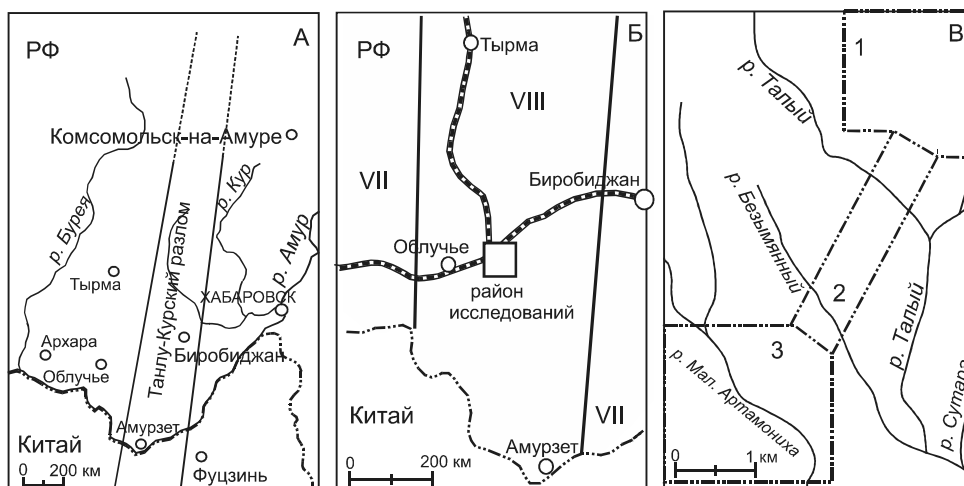
**Ключевые слова:** проявления сейсмичности, сейсмические воздействия, технология, максимальные ускорения, акселерограммы, мерзлые грунты, прогноз, Танлу-Курский линеамент, Дальний Восток.

**ВВЕДЕНИЕ**

В связи с развивающимся строительством в восточных районах РФ большое внимание уделяется прогнозу сейсмических воздействий сильных землетрясений для территорий перспективного освоения, тем более, если они осложнены наличием высокотемпературной мерзлоты. Наши исследования направлены на демонстрацию необходимости оценки участков строительства по максимальным ускорениям, преобладающим периодам сильных землетрясений, резонансным частотам рыхлой толщи и другим характеристикам сейсмических воздействий при проектировании сейсмостойких сооружений. Ожидаемым результатом исследований являются карты сейсмического микро-

районирования (СМР) и технология их построения для территорий Востока России.

В процессе исследований реализован подход, основанный на комплексировании инструментальных и расчетных методов, применяемых для построения карт сейсмического микрорайонирования с учетом деградации мерзлоты. Исследования в этом направлении проводятся большей частью геофизическими методами (сейсморазведка, электроразведка и наблюдения за близкими землетрясениями). Их задача – дифференцирование горных пород по степени их сейсмической опасности. В виду того, что основными характеристиками, которые используются для этих целей, являются скорости продольных и поперечных



**Рис. 1.** Обзорная карта района исследований (А), фрагмент карты сейсмического районирования РФ (Б) и схема расположения исследуемых площадок (В).

VII–VIII – исходная сейсмичность в баллах, согласно СНиП II-7-81\*, 1 – обогатительная фабрика, 2 – магистральный пульпопровод, 3 – шлакоотвальный комплекс.

волн, удельное электрическое сопротивление ( $УЭС$ ) и максимальные амплитуды колебаний грунтов, их изучение для конкретных грунтовых условий строительства имеет важное практическое значение [10].

Исследования проводились на участке строительства горно-обогатительного комбината (ГОКа) расположенного в Еврейской автономной области, которая находится в зоне повышенного сейсмического риска (рис. 1). Для исследуемой территории, в соответствии с картой сейсмического районирования [16], принимается следующий уровень сейсмической опасности: карта А – 8 баллов, карта В – 8 баллов, карта С – 9 баллов с периодом повторяемости 500, 1000 и 5000 лет, соответственно. Высокая сейсмичность региона и площадок строительства обусловлена наличием активной тектонической структуры – Танлу-Курский линеамент, – которая подтверждается системой крупных глубинных разломов [20, 24]. Она имеет протяженность более 3000 км и ширину до 30–40 км, протягивается на северо-восток Китая и юг российского Дальнего Востока. Материалы глубинной геофизики (магнитная и гравитационная) уточняют положение зоны Танлу-Курской тектонической структуры – она пересекает границу РФ в районе г. Биробиджан [6].

Сам разлом является высоко активной в сейсмическом плане зоной. Наиболее сильные сейсмические события (магнитуда до 8.5, интенсивность сейсмических сотрясений до 12 баллов (25.07.1668 г., координаты: 35.3 N; 118.6 E) расположены в южном фрагменте разлома (территория КНР) [18, 19, 23]. Интервал повторяемости событий с  $M = 8$  в южном фрагменте разлома составляет 3500 лет, при этом от-

мечается, что последнее событие с такой магнитудой произошло 3500 лет назад. Северная часть разлома также относится к областям с повышенной сейсмической активностью. Сейсмические сотрясения здесь оцениваются в 6–8 баллов. Наиболее изучено Баджалское землетрясение (29.08.1970 г.,  $M = 5.5$ ). В дополнение к сейсмологической статистике в процессе комплекса сейсмогеологических исследований ранее были получены данные о возможном проявлении сейсмичности в доинструментальный период. Выявленные палеосейсмогенные структуры [9, 15], в том числе и на северном участке разлома Танлу-Курский, оцениваются магнитудой 6.5–6.8.

Сейсмическая активность практически на всем протяжении разлома является основой выделения линейной зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) с магнитудой 7.5. В пределах исследуемой площади данной зоне соответствует магнитуда  $7.0 \pm 0.2$ . Основные параметры сейсмических событий региона, произошедших в инструментальный период наблюдения и которые будут использоваться для обоснования исходного сигнала, имеют следующие показатели: глубина очага – 20–30 (до 40 км), механизм очага – взбросо-сдвиг, наиболее сильные землетрясения (в радиусе до 100 км) имеют следующие параметры: магнитуда ( $M$ ) – 5.4–5.8; энергетический класс ( $K$ ) – 14.

Нами в дальнейшем исходная сейсмичность принимается по карте А (рис. 1 А) – 8 баллов с указанной выше вероятностью 500 лет. В настоящее время подготовлен новый комплект карт ОСР-2012 [17] с подробными показателями исходной сейсмичности в баллах. Он находится на стадии утверждения директивными

органами и характеризуется шестью уровнями сейсмической опасности, которые соответствуют вероятности 39 % (карта А), 10 % (карта В), 5 % (карта С), 2 % (карта D), 1 % (карта Е) и 0.5 % (карта F) возможного превышения указанных на картах максимальных расчетных значений сейсмических воздействий в течение 50-летних интервалов времени.

Например, для выбранного объекта (рис. 1 Б) исходная сейсмичность для указанных выше новых карт будет составлять 6.5, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0 и 9.0 баллов с периодом их повторяемости 100, 500, 1000, 2500, 5000 и 10 000 лет, соответственно. В итоге, для нашего случая, для принятой карты А (ОСР–97, 8 баллов,  $T = 500$  лет) будет соответствовать карта В (ОСР–2012, 7.5 балла,  $T = 500$  лет). Ясно, что здесь критерием сопоставления карт является период повторяемости. На это следует обращать внимание при проектировании строящихся сооружений.

На основе представленных нами общих показателей уровня сейсмичности, далее для конкретных участков ГОКа (рис. 1 В) дается оценка величин параметров сейсмических воздействий на случай вероятных сильных землетрясений. Рассчитаны и прогнозные их изменения с учетом данных о строении и возможном изменении состояния геологической среды. В таком направлении и излагаются принятая нами методика работ и полученные результаты исследований.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И КРАТКИЙ АНАЛИЗ ОБОБЩЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время для оценки проявлений сейсмической опасности в параметрах сейсмических воздействий для сейсмически активных районов рекомендованы и, в большей степени, используются расчетные и экспериментальные методы [8, 13]. Поэтому методика измерений, результаты расчетных и экспериментальных методов излагаются кратко и анализируются в направлении обоснования решения поставленных задач для конкретных участков строительства (рис. 1 В).

**Метод сейсмических жесткостей** является наиболее апробированным из косвенных методов сейсмического микрорайонирования. Он обоснован наличием связи данных, полученных инструментальными измерениями, с макросейсмическими проявлениями землетрясений и подтверждается, в какой-то степени, теоретическим обоснованием [7, 8, 10].

Для расчетов сейсмической опасности грунтов использовалась зависимость приращений сейсмической балльности от скоростей сейсмических волн в верхней зоне разреза по формуле С.В. Медведева (1962) с учетом поправок для талых грунтов за глубину залегания уровня грунтовых вод (УГВ) ( $h$ ) и для

мерзлых грунтов за их температуру ( $T$ ), взятую по модулю [3]:

$$\Delta I = 1.67 \text{Lg} (p_3 V_3 / p_1 V_1) + R e^{-0.04 h^* h} + R e^{-0.5 T}, \quad (1)$$

где  $p_3 V_3$  и  $p_1 V_1$  – сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов,  $\Delta I$  – расчетные значения приращений балльности. Коэффициент  $R$  – для гравийно-галечных с песчаным заполнителем, песчаных и глинистых грунтов близок к единице; для крупно-обломочных и валунных – 0.5 [10].

Измерения скоростей продольных и поперечных волн проводилось с помощью сейсморазведки, а обработка сейсмограмм – с использованием программы «RadExPro». Пример зарегистрированных непосредственно на площадке строительства дамбы (см. ниже) годографов первых вступлений продольных Р- и поперечных SH-волн и полученных скоростных разрезов представлен на рисунке 2.

Распределение скоростей по площади и с глубиной в коренных и рыхлых отложениях различного состояния приводятся в обобщенном виде. Для коренных «эталонных» пород зарегистрированы сейсмограммы в радиусе не более 5 км от территории строительства на выходах коренных пород (их обнажениях) и в карьерах. В итоге, учитывая и данные измерений скоростей на участках их близкого залегания от поверхности на исследуемых площадках (около 30 измерений), вполне обоснованно, за эталон принимаются наиболее вероятные (средние) значения скоростей в трещиноватых скальных и полускальных грунтах верхней зоны разреза, равные 2300 м/с –  $V_p$  и 1260 м/с –  $V_s$ . Объемная масса этих грунтов по инженерно-геологическим данным близка к 2.5 г/см<sup>3</sup>. Характерно, что с глубины 8–12 м скорость сейсмических волн в коренных породах достигает 2800 м/с –  $V_p$  и 1540 м/с –  $V_s$ . По сейсмическим свойствам это грунты I категории, и их сейсмическая опасность обычно принимается на один балл меньше исходной [13], в нашем случае это соответствует 7 баллам.

На участках строительства для 46 пунктов зондирований практически повсеместно до глубины 10–15 м выделяются в основном два или три слоя, по мощности и в скоростном отношении они достаточно выдержаны. Для рыхлых неводонасыщенных грунтов наиболее вероятное значение скоростей  $V_p$  близко к 600–700 м/с и  $V_s$  к 300–350 м/с, и они отнесены к «средним». Средним грунтам, согласно нормативным документам [13, 16], соответствует неводонасыщенная толща рыхлых отложений. Охарактеризованные по сейсмическим свойствам «средние» грунты относятся ко II категории, и их сейсмическая опасность соответствует исходной сейсмичности и оценивается в 8 баллов.

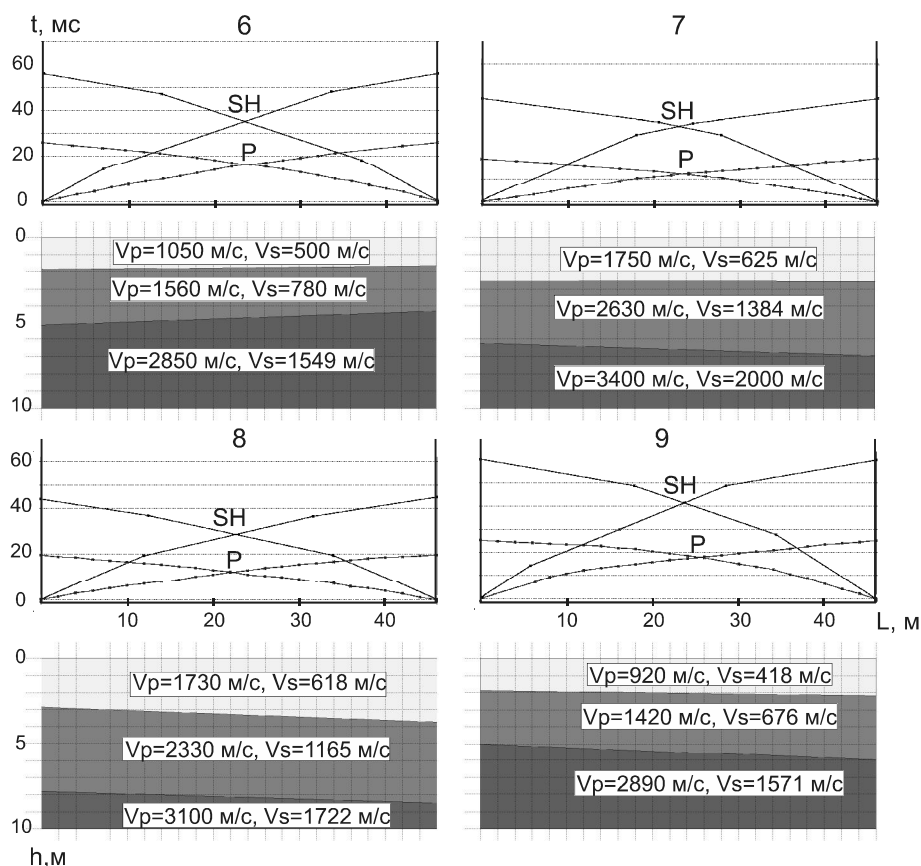


Рис. 2. Годографы P и SH волн и скоростные разрезы в пунктах измерений 6, 7, 8 и 9 (см. рис. 8).

Водонасыщенные разновидности рыхлых грунтов преобладают на участках переходов через ручьи Малая Артамониха, Безымянный и Талый, и это худшие в сейсмическом отношении участки. Скорости продольных сейсмических волн на этих участках меняются от 1500 до 1900 м/с и в редких случаях могут превышать 2000 м/с.

Мерзлые грунты выявлены по данным бурения на участке строительства первичной дамбы. Скорости продольных волн в них меняются от 2200 до 3200 м/с, и они сравнимы с «эталонными» коренными породами. В первом случае для водонасыщенных рыхлых грунтов отношение скоростей продольных волн к поперечным может достигать 3–4, а во втором, для мерзлых, близко к 1.9.

Таким образом, для реализации расчетов по методу сейсмических жесткостей получены все необходимые сведения. Данные о температуре мерзлых грунтов и глубине залегания УГВ получены отдельно по результатам инженерно-геологических и мерзлотных исследований. Сами значения скоростей продольных и поперечных волн использовались для построения необходимого набора сейсмических моделей и проведения теоретических методов.

**Метод микросейсм** основан на регистрации уровня колебаний поверхности грунтов от техногенных и природных источников. Метод позволяет получить передаточную функцию как зависимость амплитуды колебаний слоя грунтов от частоты исходного сигнала и оценить относительные отличия сейсмических свойств грунтов на исследуемой территории от таковых выбранного эталона.

В нашем случае это реализовано способом спектральных отношений [22]. Для этого проводится спектральный анализ микросейсм, а амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) определяются по отношению спектров горизонтальных (H) и вертикальных (V) компонент, то есть предполагается, что записи на горизонтальных каналах воспринимаются в качестве выходного сигнала, а на вертикальных – как входного. Отношение спектров H/V позволяет получить спектральную характеристику передаточной функции или спектральную характеристику слоя рыхлых отложений [21]. Этот способ компенсирует спектральные компоненты, вызываемые техногенным шумом, и позволяет получить в первом приближении (по отношению к детерминированным частотным харак-

теристикам, получаемым по записям землетрясений) наиболее надежные оценки преобладающих периодов (частот) колебаний грунтов.

В этом случае амплитудно-частотная характеристика определяется согласно выражению:

$$U(x) = (H_N + H_E) / 2V_Z,$$

где  $H_N$ ,  $H_E$  – спектры микросейсм по горизонтальным компонентам NS и EW,  $V_Z$  – спектр по вертикальной компоненте Z.

Максимальное значение АЧХ связано с резонансными особенностями рыхлой толщи грунта и определяет его сейсмические свойства. Приращения балльности определяются относительно скального грунта по формуле:

$$\Delta I = K \lg U_{\max},$$

где  $U_{\max}$  – максимальные значения АЧХ,  $K$  – эмпирический коэффициент и определяется на основе данных по макросейсмике или другим методам СМР. В нашем случае его значение было принято равным 2 на основании ранее проведенных работ [10, 14].

Для записи микроколебаний на площадке использовались две многоканальные цифровые сейсмические станции «Байкал-7HR» с трехкомпонентными сейсмоприемниками. В каждом пункте измерения для получения необходимой статистической надежности в оценке уровня и спектрального состава микроколебаний регистрация велась 5–10 минут. При этом регистрировались колебания в двух горизонтальных плоскостях NS и EW и в вертикальной плоскости Z.

Измерениями равномерно охвачены все разновидности грунтовых комплексов, представленных на площадках. По уровню и спектральному анализу микросейсмических колебаний оценивались сейсмические свойства грунта на исследуемой площадке. Сами возможности этого метода представляются примерами записей микросейсм и обобщенными амплитудно-частотными характеристиками для контрастных грунтовых условий: коренных пород, водонасыщенных, неводонасыщенных и мерзлых рыхлых грунтов (рис. 3).

Представленные средние частотные характеристики указывают на значительные интервалы изменения относительных величин их колебаний на фиксированных частотах даже для однородных участков строительства, а их уровни, в свою очередь, подтверждают их зависимость от частоты сейсмических колебаний.

Амплитудно-частотные характеристики оценивают степень увеличения интенсивности колебаний грунтов в зависимости от частоты, а огибающая кривая максимальных значений амплитуд говорит о возможных отклонениях, которые будут учтены при комплексной оценке сейсмической опасности грунтов различного состояния для исследуемых площадок и при проведении теоретических расчетов. По

рисункам (рис. 3) наглядно выявляются различия в амплитудном уровне микросейсм, зарегистрированных на участках с различным составом и состоянием исследуемых грунтов. Так для неглубокого залегания коренных «эталонных» пород средний уровень меняется от 1 до 1.5, на участках, соответствующих неводонасыщенным рыхлым грунтам, средний уровень близок к 2 и для водонасыщенных рыхлых грунтов максимальные значения меняются от 2 до 4.

Уровни передаточных функций АЧХ непосредственно использовались для расчета приращений балльности для каждого пункта регистрации микросейсм по приведенной выше формуле. Если говорить о максимальных значениях частотных характеристик, которые рекомендуется использовать для расчетов сейсмической опасности, то они отличаются от «эталонного» (коренные породы) в два-четыре раза (рис. 3). Сами уровни АЧХ для каждого пункта измерений определяются строением и составом грунтов и характеризуют их изменение в зависимости от частоты колебаний грунтовых слоев, что учитывалось при проведении дальнейших расчетов.

**Расчетные методы.** Для комплексной оценки проявления прогнозной сейсмичности площадок строительства (рис. 1 В) кроме сейсмической опасности в баллах необходимы сведения о количественной оценке параметров движений грунта на случай сильных землетрясений. Это, прежде всего, максимальные ускорения колебаний грунтов, преобладающий период колебаний и резонансные частоты рыхлой толщи. В свою очередь для их получения нами реализованы следующие этапы исследований: задание исходного сигнала (с учетом зон ВОЗ и параметров очага), построение необходимого числа сейсмических моделей и проведение теоретических расчетов. В такой последовательности и реализованы намеченные нами подходы к количественному обоснованию проявлений прогнозной сейсмичности изучаемых площадок.

**Для синтеза исходной акселерограммы предложены** следующие выбранные нами процедуры. Вначале были отобраны имеющиеся записи акселерограмм из интересующих нас зон ВОЗ с магнитудой 3.8–5.0 и эпицентральной расстоянием от 4 до 220 км (всего 21 землетрясение, рис. 4 А). Глубины очагов лежат в интервале 6–33 км. Для каждой компоненты были рассчитаны спектры, они нормированы и получены средние из них для трех компонент EW, NS и Z (рис. 4 Б). Средние спектры достаточно наглядно характеризуют распределение интенсивности колебаний относительно слабых землетрясений по частотному составу. Основные максимумы спектров приходятся на интервал частот от 1.2 до 3.8 Гц на уровне 0.7 от их основных максимумов.

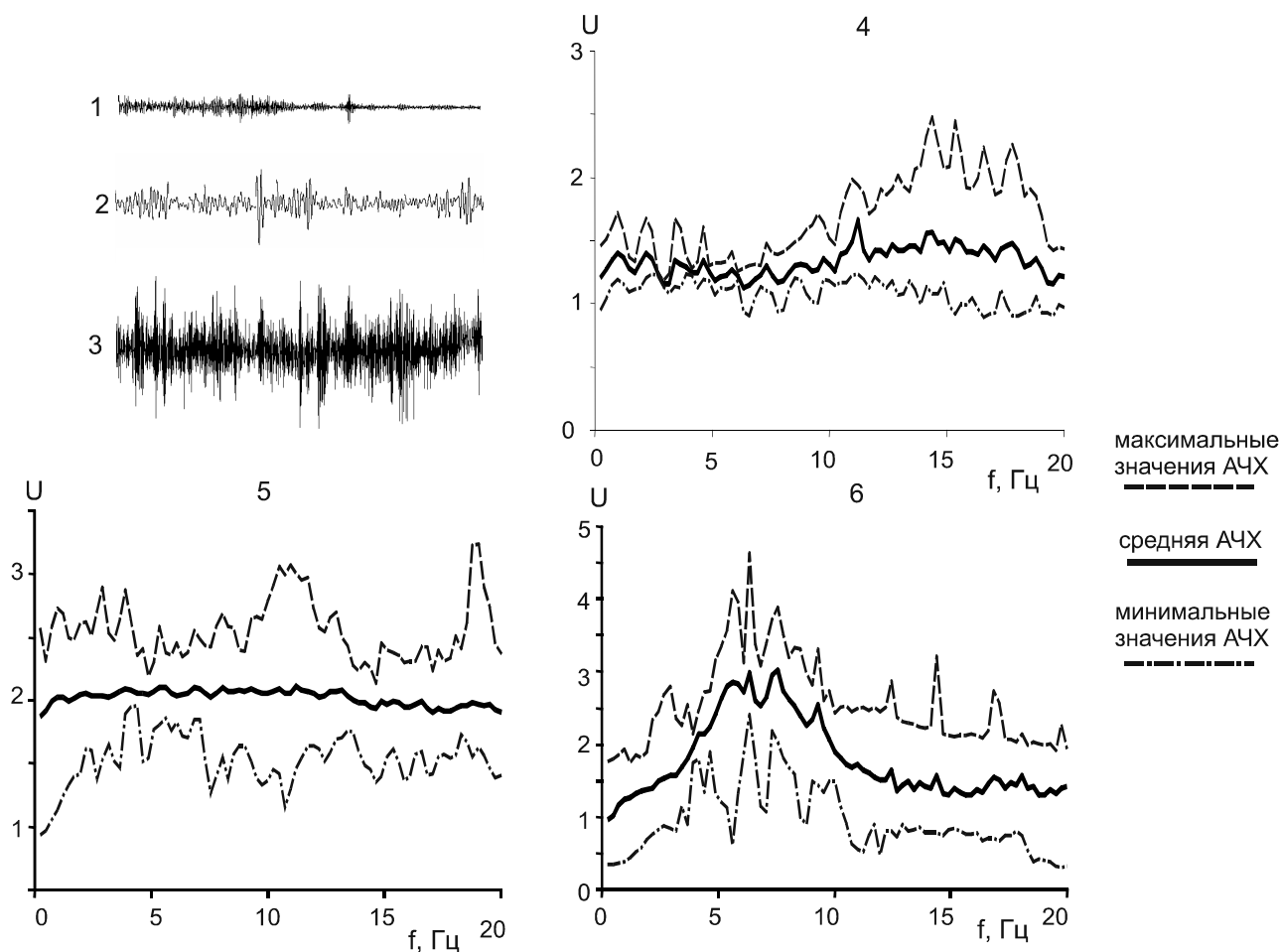


Рис. 3. Обобщенные экспериментальные данные по методу микросейсм.

Примеры записей микросейсм: 1 – для коренных пород, 2 – для неводонасыщенных рыхлых грунтов, 3 – для водонасыщенных рыхлых грунтов, 4 – АЧХ для коренных пород различной степени сохранности и неглубокого их залегания, 5 – АЧХ для рыхлых неводонасыщенных и мерзлых ( $T > -0.5^{\circ}\text{C}$ ) грунтов, 6 – АЧХ для рыхлых водонасыщенных грунтов.

В общем, не исключая результаты выполненного анализа по слабым землетрясениям района строительства, приведенного выше, мы основывались и на предшествующем опыте их задания [4]. В результате для дальнейших расчетов из нормированных акселерограмм использовались сформированная акселерограмма для максимальной горизонтальной компоненты и ее спектр (рис. 4 В). Но для дальнейших расчетов она масштабировалась на уровень принятой исходной сейсмичности по максимальным ускорениям, что допускается нормативными документами при отсутствии достаточного набора записей сильных землетрясений.

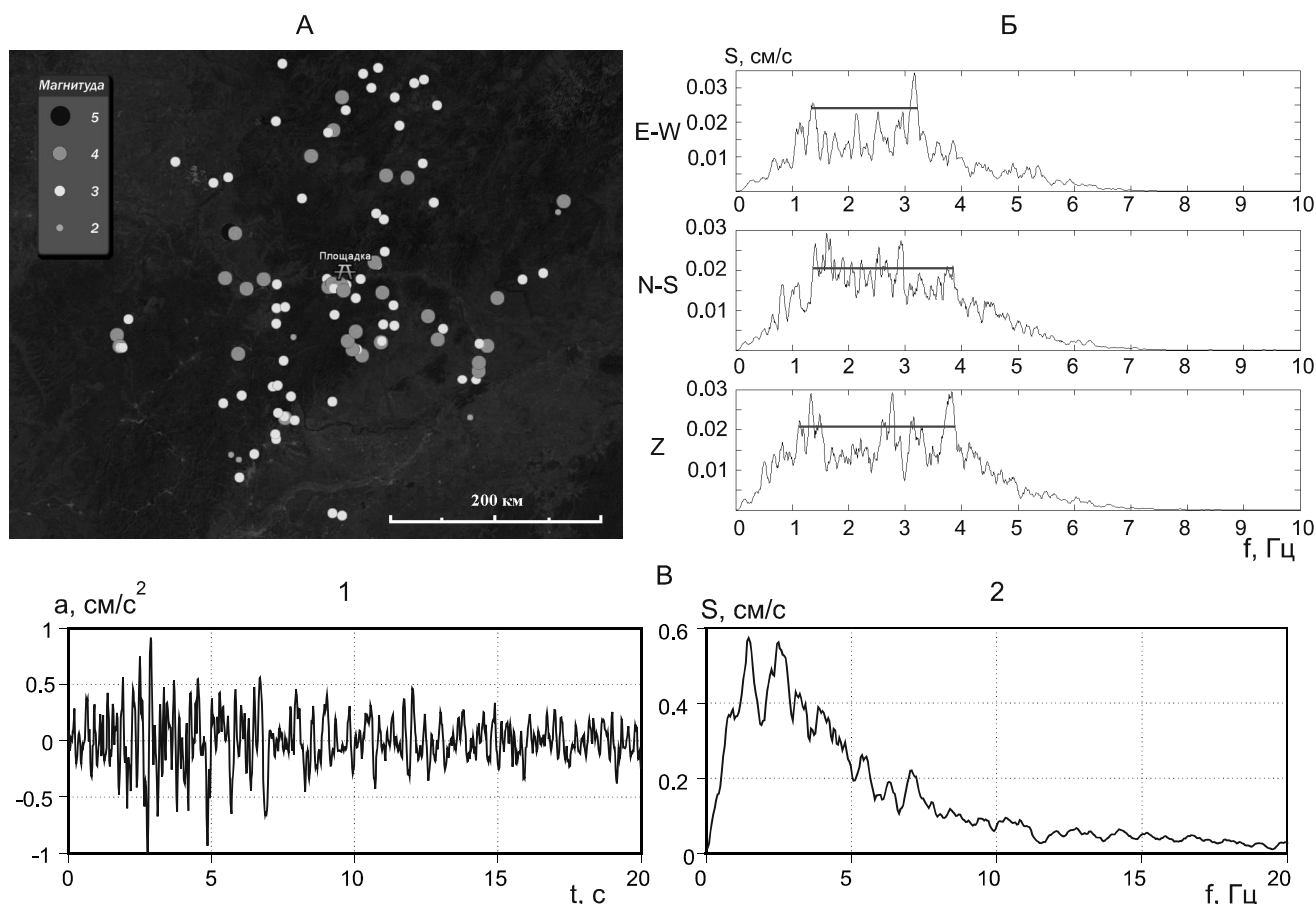
Основные параметры нормированной акселерограммы для максимальной горизонтальной компоненты (рис. 4 В) следующие. Продолжительность колебаний около 20 с на уровне 0.3 от максимума, интервал частот спектра на уровне 0.5 от максимума меняется от 0.7 до 5 Гц, что находится в хорошем согласии с

параметрами средних спектров для использованных землетрясений (рис. 4 Б). Максимальные значения основных максимумов спектра приходятся на частоты 1.46 и 2.49 Гц.

Таким образом, параметры синтезированной акселерограммы по предложенному способу (по частотному составу) отвечают как близким, так и относительно далеким сильным землетрясениям.

*Для построения моделей* использовались данные бурения и результаты обобщенных геофизических измерений (см. выше). Но такое построение касалось только площадки ГОКа, где мощность рыхлых и разрушенных пород достигала 60 м. Для остальных площадок, где их мощность была меньше 20 м, расчетные значения скоростей брались измеренными для конкретных пунктов сейсмозондирования.

Но для выявления общих закономерностей для примера используются параметры трех моделей



**Рис. 4.** Этапы формирования исходного сигнала.

А – карта эпицентров выбранных землетрясений района проектируемого строительства (по данным ISCDD); Б – средние амплитудные спектры для EW, NS и Z компонент из выбранных землетрясений; сплошной линией указан интервал частот на уровне 0.7 от максимального значения спектра; В – нормированная исходная акселерограмма (1) и ее амплитудный спектр (2) для максимальной горизонтальной компоненты.

(табл.), отличающихся контрастными свойствами исследуемых грунтов. Они обоснованы во втором разделе статьи по данным двух методов сейсмических жесткостей и микросейсм и представляются по параметрам сейсмических воздействий по данным теоретических расчетов (рис. 5).

Важно, что эти модели объединяет один параметр – это мощность верхнего слоя, равная 10 м. Но они могут рассматриваться как эталонные (согласно нормативным документам [13]) для каждого состояния коренных и рыхлых пород.

Обобщенные модели представляют I, II и III категории грунтов по сейсмическим свойствам [16] и различаются они в основном распределением скоростей сейсмических волн в верхней до 10–20 м зоне разреза. Результаты расчетов показывают (рис. 5), что для коренных «эталонных» пород максимальные ускорения составляют 110, для «средних» – 218 и для водонасыщенных – 390 см/с<sup>2</sup>. По шкале балльности

это приравнивается к 7, 8 и 9 баллам, соответственно. Наибольшие усиления для неводонасыщенных грунтов отмечаются на частоте, близкой к 9 Гц, для водонасыщенных такой же мощности – на частоте 5 Гц. Максимальные значения спектра для всех грунтовых моделей 1, 2 и 3 отмечаются на частоте 2.4 Гц и равны 23, 46 и 81 см/с, соответственно.

Выявленные общие закономерности изменения характеристик и параметров сейсмических воздействий каждым из использованных методов для преобладающих разновидностей грунтов по их состоянию для территории строительства ГОКа использовались нами для решения поставленных основных задач.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАЙОНИРОВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ПРОГНОЗНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК**

Степень проявления сейсмических воздействий от установленного уровня (первый раздел) будет

Таблица. Параметры расчетных сейсмических моделей для обобщенных типовых разрезов.

№ модели	H, м	V <sub>p</sub> , м/с	V <sub>s</sub> , м/с	ρ, т/м <sup>3</sup>	A <sub>max</sub> (см/с <sup>2</sup> ) I (баллы)
№1 Коренные породы (модель эталона)	10	2300	1260	2.5	110
	∞	2800	1540	2.6	7
№2 (средние грунты)	3	600	240	1.8	218
	7	700	350	1.9	
	12	2300	1260	2.5	
№3 Водонасыщенные средние грунты	∞	2800	1540	2.6	8
	10	1600	420	2.0	390
	12	2300	1260	2.5	9
	∞	2800	1540	2.6	

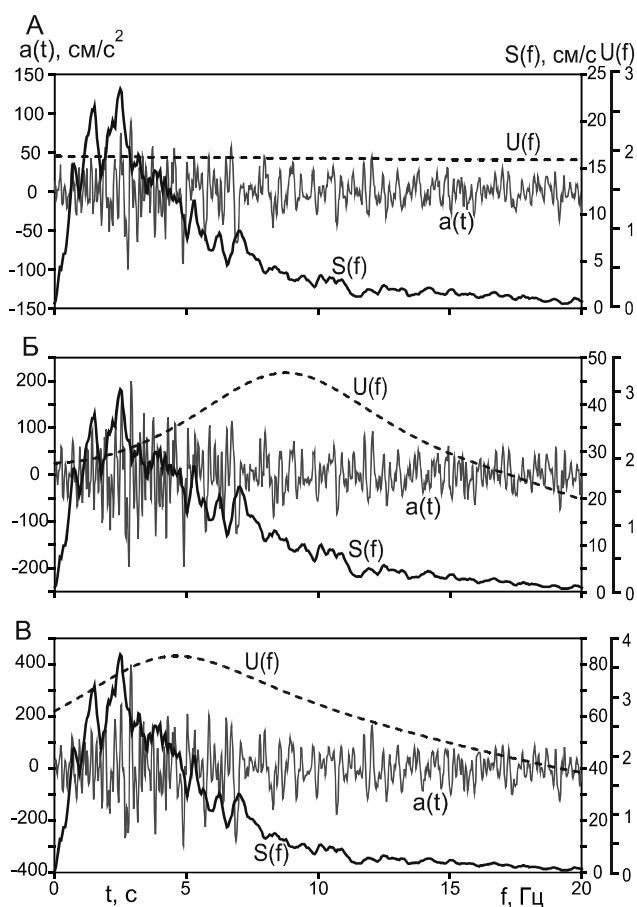


Рис. 5. Эталонные характеристики сейсмических воздействий для грунтов I – А, II – Б и III – В категории строительства (исходная сейсмичность 8 баллов).

$a(t)$  – акселерограммы в см/с<sup>2</sup>,  $S(f)$  – спектры ускорений в см/с и  $U(f)$  – амплитудно-частотные характеристики верхнего эталонного слоя, мощностью 10 м.

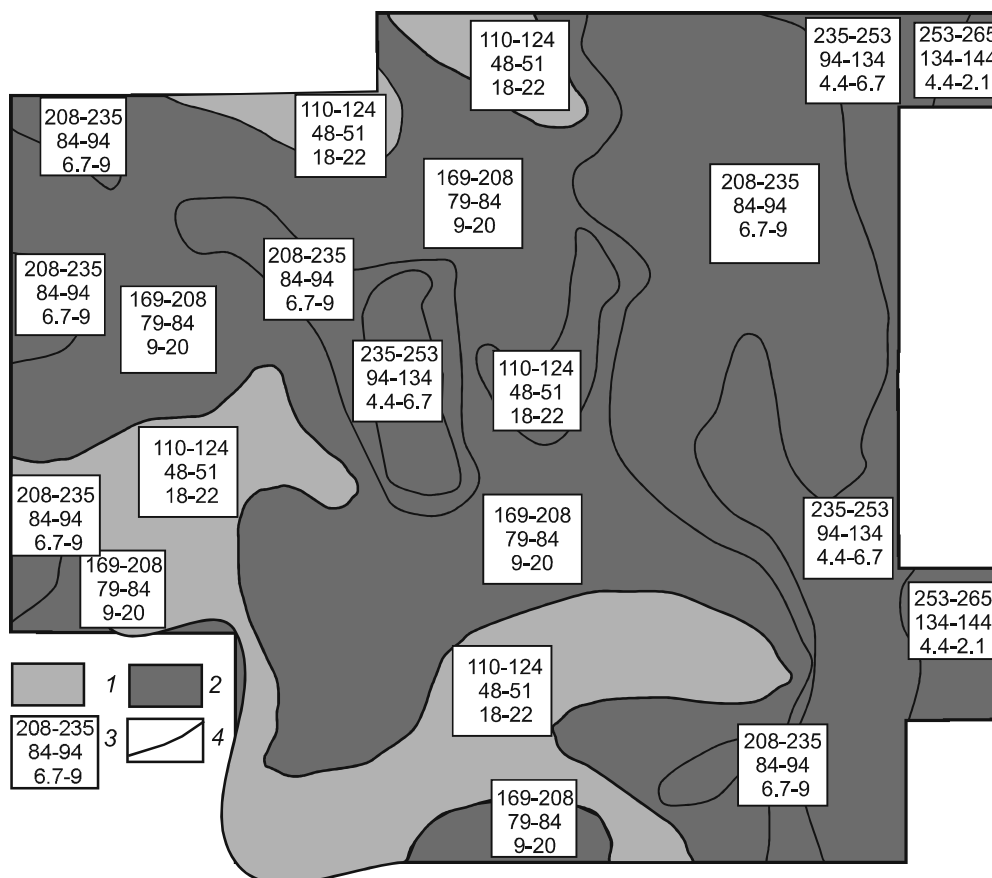
определяться, как отмечено выше, в зависимости от грунтовых, мерзлотных и гидрогеологических условий строительства. В отношении технологии построения карт проявления прогнозной сейсмичности

застраиваемых территорий Восточной Сибири, на основе использования данных, изложенных во втором разделе, намечается вполне обоснованный эмпирический подход. Строительные условия для трех участков различаются и, следовательно, усложняется подход к районированию их сейсмической опасности, поэтому мы представляем их отдельно в виде карт-схем. Каждая карта-схема построена на основе данных, представленных в обобщенном виде во втором разделе, и при необходимости дополняются результатами выполненных теоретических расчетов. Сам подход реализуется для участков строительства обогатительной фабрики – неводонасыщенные грунты, дамбы хвостохранилища – с включением водонасыщенных грунтов, и магистрального пульпопровода – с включением водонасыщенных и мерзлых грунтов. Районирование проведено по основным параметрам сейсмических воздействий прогнозируемого сильного землетрясения и, естественно, в какой-то степени отражает необходимость повышения степени обоснованности с усложнением инженерно-геологических и мерзлотных условий строительства.

Обогатительная фабрика (рис. 6) занимает северо-восточную и центральную часть исследуемой территории, бассейн р. Сутара (рис. 1 В).

По геоморфологическому строению территория представляет собой повышенную часть с расчлененным сглаженным рельефом и пониженную его часть – поверхность аллювиальных террас рек и ручьев. Повышенные части рельефа характеризуется распространением скальных грунтов с глубины 2–5 м, представленных кристаллическими породами – гранитами, гранодиоритами, а также известняками и доломитами. Пониженные районы соответствуют спокойному с малым градиентом по высоте рельефу. Аллювиальные отложения представлены преимущественно песчаными и песчано-галечниковыми породами, местами заторфованными и водоносными.





**Рис. 6.** Районирование проявления прогнозной сейсмичности в параметрах сейсмических воздействий для площадки строительства ГОКа.

1 – 7-балльная зона; 2 – 8-балльная зона; 3 – верхнее значение – максимальные ускорения (см/с<sup>2</sup>) для компоненты (EW), среднее значение – максимальные ускорения (см/с<sup>2</sup>) для компоненты (Z), нижнее значение – резонансные частоты рыхлого слоя (Гц); 4 – границы участков, в выделенных сейсмических зонах, с различными значениями сейсмических воздействий.

Уровень грунтовых вод колеблется в зависимости от уровня воды в реках, с которыми имеет непосредственную гидравлическую связь.

Семибалльная зона характеризуется неглубоким залеганием коренных пород (менее 4–5 м). Среднее значение скоростей сейсмических волн в верхнем 10-метровом слое меняется от 1400 до 1800 м/с. Приращения балльности по отношению к «эталону» по методу сейсмических жесткостей и микросейсм меняются от 0.2 до 0.5 баллов. Максимальные значения ускорений для горизонтальной компоненты для сильных землетрясений могут меняться от 110 до 124 см/с<sup>2</sup>, для вертикальной лежат в интервале 48–51 см/с<sup>2</sup>, резонансная частота верхнего слоя 18–22 Гц. Основные максимумы спектров ускорений приходятся на частоту 2.54 Гц, а их максимальные значения равны 22.1 и 10 см/с, соответственно для компонент NS и Z.

Восьмибалльная зона охватывает всю остальную территорию строительства. Среднее значение

скоростей сейсмических волн в верхнем 10-метровом слое для этой зоны меняется от 460 до 1200 м/с. Приращения балльности по отношению к «эталону» по методу сейсмических жесткостей и микросейсм меняются от 0.5 до 1.3 баллов. Максимальные значения ускорений для горизонтальной компоненты для сильных землетрясений могут меняться от 169 до 265 см/с<sup>2</sup>, для вертикальной лежат в интервале 79–144 см/с<sup>2</sup>, резонансная частота верхнего слоя 2.1–20 Гц. Сама 8-балльная зона в связи с изменением мощности рыхлых отложений разбита на три зоны, основные изменения в которых связаны со значениями максимальных ускорений и резонансной частотой. Максимумы спектров ускорений приходятся на частоты 2.54 – NS и 2.54–7.08 Гц – Z, а их максимальные значения равны 31.6–61.6 и 14.3–35.2 см/с, соответственно для NS и Z компонент.

**Магистральный пульпопровод.** По данным бурения по трассе пульпопровода (рис. 7) вскрыты

отложения элювиально-делювиального (повышенные формы рельефа) и аллювиального (долины ручьев) комплексов. В состав склоновых формирований входят суглинки, супески, пески, дресва. На границе со скальными грунтами – щебень. Гравийно-песчаная смесь является основой аллювиальных отложений. Скальные грунты представлены гранитами, расположенными с глубины от 2 м (в зависимости от относительных отметок рельефа – склона).

Грунты (с поверхности) подвержены сезонному промерзанию до 2 м. Мерзлые грунты встречены только на склонах ручьев, это высокотемпературная мерзлота малой мощности. При оценке сейсмической опасности считалось, что она деградирует в процессе строительства. В переходной зоне от относительно повышенных форм рельефа к долинам ручьев отмечено близкое к поверхности залегание УГВ (2.5–3 м) с подъемом до поверхности в долинах ручьев. Районирование ее сейсмической опасности мы даем в виде карты-схемы (рис. 7) по площади на случай изменения положения трассы в процессе проектирования и строительства.

Как и для предыдущих ответственных участков, результаты расчетов приращений сейсмической балльности по методу сейсмических жесткостей для естественного состояния грунтов находится в интервале от 7.51 до 9.01 баллов и по методу микросейсм от 8.2 до 9.0. В итоге сейсмическая опасность площадки по инструментальным методам оценивается в 8 и 9 баллов. Для 8-балльных зон максимальные ускорения для вероятных сильных землетрясений могут меняться от 158 до 218  $\text{см}/\text{с}^2$  – NS и от 80 до 98  $\text{см}/\text{с}^2$  – Z, резонансные частоты – больше 8 Гц. Для 9-балльных зон они увеличиваются до 390  $\text{см}/\text{с}^2$  и 161  $\text{см}/\text{с}^2$  для компонент NS и Z, соответственно.

**Участок дамбы хвостохранилища (рис. 8).** На участке расположения основания дамбы вскрыты и подтверждены бурением отложения аллювиального (долина ручья) и элювиально-делювиального (повышенные формы рельефа) комплексов. В состав склоновых формирований входят супеси, пески, дресва, щебень, их объемная масса 1.8–1.9  $\text{т}/\text{м}^3$ . На первых террасах склона, по данным бурения и электроразведки, отмечена мерзлота мощностью до 12 м, а на южных фрагментах – только до 2 м. В долине ручья (центральная часть плотины) рыхлые – аллювий (галечники, пески), элювий (супеси, дресва, щебень) – и разрушенные скальные грунты подвержены полному промерзанию (данные бурения до 20 м), их объемная масса меняется в значительных пределах от 1.8 до 2.2  $\text{т}/\text{м}^3$ . Льдистость мерзлых грунтов в пределах русла ручья отмечена как отдельными включения-



**Рис. 7.** Карта-схема проявления прогнозной сейсмичности для площадки магистрального пульпопровода.

ми, так и льдом-цементом. По своему состоянию это пластично-мерзлые грунты, их температура близка к нулю и на глубине нулевых ее колебаний оценивается в центральной части дамбы не ниже  $-0.5^\circ\text{C}$ . Присутствие воды обнаружено в сезонно-талом слое в русле ручья и при сезонном оттаивании на склонах дамбы. Скальные грунты представлены гранитами с различной степенью прочности, расположены с глубины от 10 (на склонах) до 20 метров (центральная часть русла р. М. Артомониха), их объемная масса, по данным

инженерно-геологических исследований и принята нами для дальнейших расчетов, равна 2.5–2.7 т/м<sup>3</sup>.

Для обоснования расчетных моделей использовались данные бурения и результаты сейсморазведочных измерений. Принятые модели охватывают возможные изменения по мощности залегания рыхлых грунтов на площадке строительства, по их состоянию и по наиболее вероятным изменениям скоростей сейсмических волн до глубины залегания «эталонных» коренных пород.

Для участка дамбы хвостохранилища этим требованиям отвечают результаты сейсмозондирований, вынесенные на инженерно-сейсмологический разрез (рис. 8). Общая мощность до залегания плотных коренных пород, служащих «эталонном», определялась также с учетом распределения скоростей сейсмических волн с глубиной, и она не превышает 20 м.

Расчеты проведены для пунктов 2–9, обозначенных на рисунке 8, с помощью метода тонкослоистых сред при использовании программы Л.И. Ратниковой (1984) и методических подходов, изложенных выше и в работах [2, 5, 12]. Вполне обоснованно в качестве исходной акселерограммы использовался сформированный нами сигнал для «эталонных» коренных пород (рис. 5 А). Результаты расчетов приводятся в графической форме (рис. 8 А).

В итоге для естественного состояния грунтов сейсмическая опасность дамбы оценивается по инструментальным методам однозначно в 8 баллов, максимальные ускорения для вероятных сильных землетрясений могут меняться от 158 до 196 см/с<sup>2</sup> – NS и от 77 до 98 см/с<sup>2</sup> – Z, резонансные частоты больше 17 Гц.

В то же время, сама видимая однородность по сейсмическим свойствам для естественного состояния грунтов в основании дамбы обязана наличию в русле ручья Артамониha пластично-мерзлого их состояния ( $T > -0.5^{\circ}\text{C}$ ). Эта нестабильная физическая особенность высокотемпературной мерзлоты и обязывает к проведению прогноза изменения сейсмической опасности основания дамбы, связанной с вероятностью ее деградации в результате строительства и эксплуатации хвостохранилища [3]. Предполагается, что хвостохранилище будет заполнено на уровне отметки планирования дамбы, в соответствии с рис. 8, и, соответственно, грунты в основании дамбы по всей ее длине перейдут в водонасыщенное состояние.

Для расчета сейсмической опасности грунтов в новом состоянии, прежде всего, был дан прогноз скоростей сейсмических волн для водонасыщенного состояния грунтов, для этого использовались установленные ранее зависимости [1] и данные о скоростях  $V_p$  и  $V_s$ , полученные для аналогичных по составу

грунтов в районе строительства. Результаты самого прогноза не приводятся, он имеет второстепенное значение, поскольку для расчетов сейсмической опасности в баллах используются их значения в верхней зоне разреза в грунтах, находящихся в воздушно-сухом состоянии с учетом поправки за глубину залегания УГВ согласно формуле (1). Расчет акселерограмм и максимальных ускорений, в этом случае, проведен при использовании экспериментальных частотных характеристик для водонасыщенных грунтов (рис. 3.6) для их максимальных значений.

В то же время, набор последних ограничен, но используемая огибающая частотная характеристика наиболее достоверно оценивает сам уровень возможного увеличения интенсивности сейсмических колебаний слоя водонасыщенных грунтов по отношению к эталонным коренным породам. Далее в пределах погрешности используемых расчетных методов по сформированным прогнозным сейсмическим моделям мы можем рассчитать соответствующие им частотные характеристики и уточнить резонансные значения частот для каждой из них. Результаты таких расчетов представлены на рис. 8 Б.

В результате, на случай первичного заполнения дамбы хвостохранилища, деградации мерзлоты и поднятия УГВ до отметки ее заполнения, получены следующие параметры сейсмических воздействий. Приращение балльности по отношению к «эталону» по методу сейсмических жесткостей меняется от 1.2 до 2.17 баллов. В итоге сейсмическая опасность в баллах будет меняться от 8.22 до 9.17 баллов, а сам участок строительства дамбы разделяется на 8 и 9 баллов (рис. 8 Б). Максимальные значения ускорений для горизонтальной компоненты для сильных землетрясений могут меняться от 187 до 424 см/с<sup>2</sup>, для вертикальной лежат в интервале 81–205 см/с<sup>2</sup>, резонансная частота верхнего слоя меняется от 13.4 до 20 и более Гц. Основные максимумы спектров ускорений приходятся на частоты 2.49 и 2.54 Гц, а их максимальные значения находятся в интервалах 43.5–92 и 18.7–46.0 см/с для компонент NS и Z, соответственно.

Таким образом, представленные результаты основаны на реализации принципа комплексирования инженерно-геологических, инструментальных и расчетных методов районирования сейсмической опасности, основным итогом которого является количественная оценка прогнозируемых параметров сейсмических воздействий на случай сильных землетрясений для конкретных строительных объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании комплекса экспериментальных и расчетных методов, анализа сейсмогеологиче-

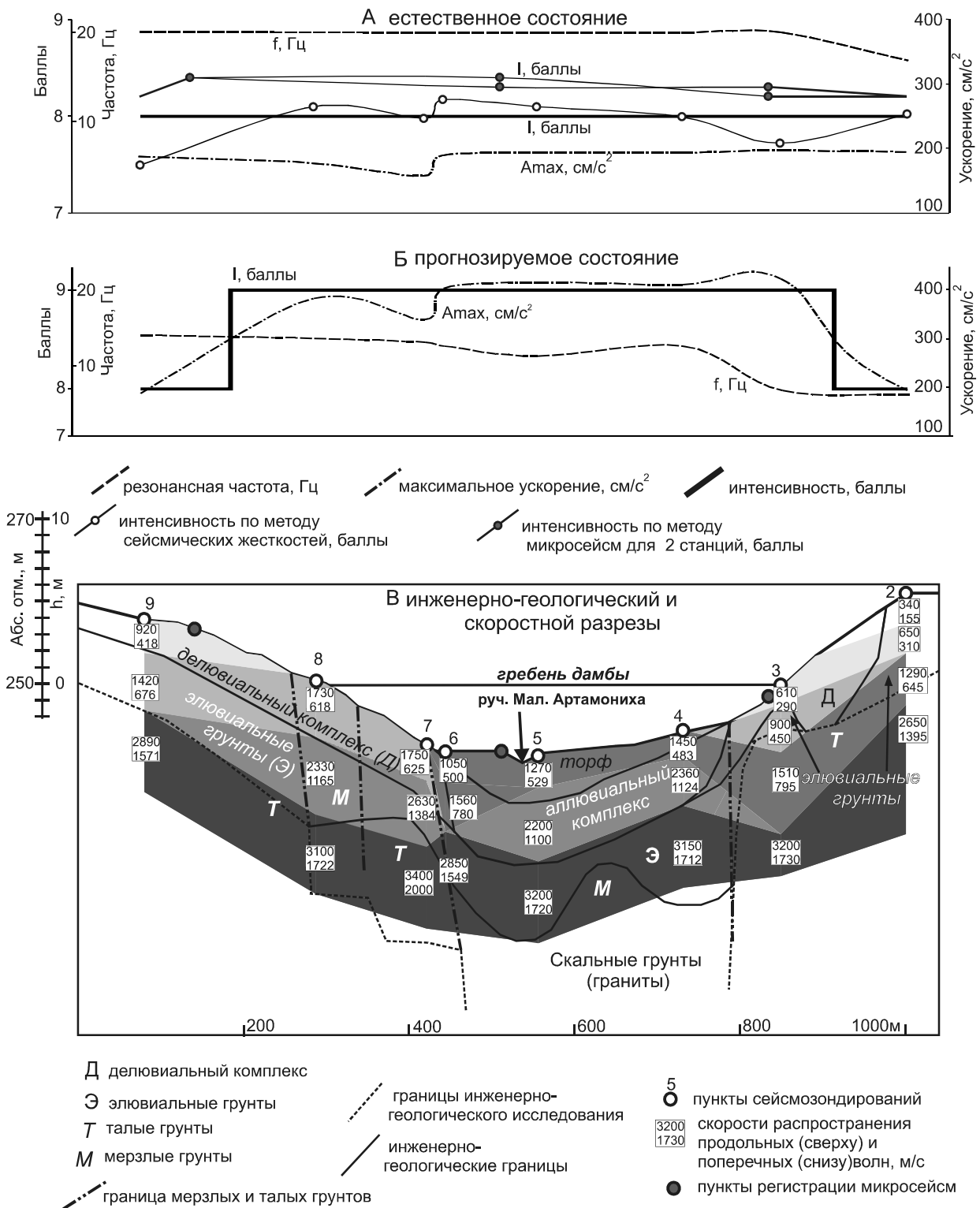


Рис. 8. Инженерно-сейсмологический разрез участка строительства дамбы хвостохранилища (В) для естественного состояния грунтов (А) и прогнозируемого состояния (Б).

ских и инженерно-геологических данных, нами были получены все необходимые сведения для построения карт проявления сейсмичности с учетом параметров прогнозируемого сильного землетрясения в пределах активной тектонической структуры Танлу-Курского линеамента. Реализован подход к оценке сейсмической опасности исследуемых территорий в баллах и по максимальным ускорениям для двух компонент на случай сильных землетрясений.

Предложенная комплексная оценка инженерно-сейсмологических условий строительства предусматривает получение на современном уровне набора основных параметров сейсмических воздействий для участков, расположенных в сложных сеймотектонических и мерзлотных условиях как для естественного состояния грунтов, так и в случае деградации мерзлоты.

Деградация мерзлоты приводит к значительному ухудшению инженерно-сейсмологических условий строительства. На примере грунтов основания дамбы хвостохранилища показано, что распределение акустических жесткостей в слоях полностью не решает задачу оценки сейсмической опасности мерзлых и оттаявших грунтов. Здесь на первый план выходят прочностные характеристики, которые определяются их составом, температурой и физическим состоянием. Учет этих параметров нами проведен через использование температуры мерзлоты, обводненности грунтов по методу сейсмических жесткостей, частотных характеристик по данным метода микросейсм.

В методическом плане, в первом приближении, в отношении технологии построения карт сейсмического микрорайонирования для территорий Сибири и Дальнего Востока намечается вполне обоснованный эмпирический подход, который предусматривает оценку максимальных сейсмических воздействий, основанных на экспериментальном изучении наиболее распространенных типов грунтов в регионах, подлежащих долгосрочному и микросейсмическому районированию. Основная его задача – изучение спектров и спектральных характеристик колебаний грунтов при слабых и умеренной силы землетрясениях. Не отрицая в целом полезность получения такого набора данных, необходимо признать, что он не полностью отвечает решению поставленной задачи. Это связано с тем, что разработка достоверной методики районирования сейсмической опасности, как и оценка проявления сейсмичности на прогнозируемые сильные землетрясения, сдерживается недостатком этих же (экспериментальных) данных о параметрах нелинейных деформаций грунтов, слабой изученностью параметров волновых полей в эпицентральных зонах сильных землетрясений и параметров полей относительно сильных транзитных землетрясений.

Поэтому предлагаемая нами технология построения карт касается отмеченных выше направлений и основана на использовании комплекса существующих инструментальных методов сейсмического микрорайонирования, параметрического задания исходной сейсмической опасности сильных землетрясений, реализации теоретических расчетов, а также разработке и научном описании новых способов прогнозирования сейсмических воздействий сильных землетрясений.

Такой подход приводит к возможности оценки сейсмической опасности территории строительства в баллах и в максимальных ускорениях в соответствии с требованиями нормативных документов по проектированию сейсмостойких сооружений.

Необходимо отметить, что исследования по вопросам сейсмичности Еврейской автономной области находятся на стадии их уточнения (об этом свидетельствуют карты ОСР-97 и ОСР-2012, сопоставление которых по основным их показателям приведено в первом разделе). В этом отношении изучение значимых характеристик очагов землетрясений в связи с современной тектонической активностью Танлу-Курского линеамента остается в числе актуальных задач, требующих дальнейшего уточнения. Поэтому полученные результаты проявления прогнозной сейсмичности на территории объектов Кимкано-Сутарского ГОКа для различного состояния грунтов являются, в какой-то степени, относительными и могут корректироваться в связи с уточнением исходной сейсмичности района.

Работа выполнена частично при поддержке гранта РФФИ №15-17-20000.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джурик В.И. Метод прогноза упругих параметров мерзлых грунтов при их оттаивании // Инженерная геология и инженерная сейсмология зоны БАМ. Новосибирск: Наука, 1985. С. 72–92.
2. Джурик В.И., Дренов А.Ф. Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны. Новосибирск: СО РАН, 2000. 270 с.
3. Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Д. Изучение динамики сейсмического риска в условиях эволюционирующей криолитозоны // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 2. С. 108–115.
4. Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю. Методика формирования сейсмического сигнала с целью районирования сейсмической опасности городских агломераций (на примере г. Иркутска) // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2012. Т. 5, № 2. С. 96–110.
5. Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Дреннова Н.Н. Основные параметры спектров ускорений при землетрясениях с  $M > 5$  для Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 5. С. 984–994.

6. Карта разломов территории СССР и сопредельных стран. 1:2 500 000. М.: Мингео, 1980.
7. Максимов А.Б. О сейсмической жесткости грунтов. Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С. 145–152.
8. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат, 1962. 260 с.
9. Николаев В.В., Семенов Р.М., Солоненко В.П. О предельной силе землетрясений и проблеме сейсмического районирования Дальнего Востока (зона БАМ) // Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С. 76–84.
10. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность // Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию М.: Наука, 1988. 300 с.
11. Ратникова Л.И. Расчет колебаний на свободной поверхности во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1984. С. 116–121.
12. РБ-006-98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. М.: Госатомнадзор России, 1988. 63 с.
13. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. М.: Госстрой СССР, 1986. 62 с.
14. Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1984. 224 с.
15. Сейсмотектоника и сейсмическое районирование Приамурья. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с.
16. СНиП II-7-81\*. Актуализированная редакция. Строительство в сейсмических районах. М.: Мин-во регион. развития РФ, 2011. 71 с.
17. Уломов В.И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсмотеопасность России» // Геориск. 2011. № 6. С. 78–93.
18. Чипизубов А.В. Реконструкция и прогноз изменений сейсмичности Земли. Иркутск, 2008. 240 с.
19. Lee W.H.K., Wu F.T., Jacobsen C. A catalog of historical earthquakes in China compiled from recent Chinese-publications // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1976. V. 66, N 6. P. 2003–2016.
20. Lu Yu., Yu H. Ding Yu. Ginglong et al. Changing stress field in the middle segment of the Tanlu fault zone, eastern China // Tectonophyses. 1983. V. 93, N ¾. P. 253–270.
21. Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarter. Report of Railway Technical Res. Institute. 1989. V. 30. P. 25–33.
22. Nakamura Y., Gurler E., Saita J. Vulnerability investigation of Roman Coliseum using microtremor // Proc., 12th WCEE in Auckland. 2000. NZ. P. 1–8.
23. Yang Xiao-ping et al. A recent paleoearthquake on Qingfengling seismic fault of Tanlu fault zone // Acta Seismologica Sinica. 2006. V. 19, N 2. P. 225–230.
24. Zhou Fuhong. The relation of the Tancheng-Luijing fault with the main faults in the southern part of Northeast China // Seismol. Geol. 1985. V. 7, N 2. P. 17.

*Рекомендована к печати В.Г. Быковым*

***V.I. Dzhurik, S.P. Serebrennikov, E.V. Bryzhak, A.Yu. Eskin, A.N. Shagun***

### **Zonation of the expected seismic site effects within the Tanlu-Kursk Lineament, Far East**

Consideration is being given to seismic hazard zonation within the Tanlu-Kursk lineament within an active tectonic feature by the example of the Kimkan-Sutar mining and concentrating mill construction sites in the Jewish Autonomous Region. The largest seismic events herein ( $M=8.5$  and the intensity of seismic tremors up to 12 points) are located in the southern fragment of the fault (P.R. China). The recurrence interval of events with  $M=8$  in the southern fragment of the fault is 3500 years old.

The studies include an approach based on the combination of computational and instrumental methods that are used to create seismic microzonation maps with regard to permafrost degradation. The study methods reported involve theoretical calculations, instrumental seismic and electric measurements, and seismic survey. They are aimed at differentiating between the rocks according to propagation velocities of seismic waves and amplitude and frequency of motion in the layers in relation to their composition and state. Eventually these properties determine an intensity degree for predicted large earthquakes.

A special emphasis is put on the quantitative substantiation of expected seismic site effects with regard to ground conditions at the bottoms of the sites from the peak ground accelerations predicted. An approach has been proposed for substantiating the selection of an initial signal to make the theoretical calculations whose results are represented as schematic maps of the parameters of seismic effects expected for certain sites. To the first approximation, the selected approaches have provided a basis for the procedure of engineering-seismological profiling along the tailing dam site with regard to potential permafrost degradation while building.

**Key words:** manifestation of seismicity, seismic effects, procedure, peak accelerations, accelerograms, frozen grounds, prediction, Tanlu-Kursk Lineament, Far East.