

Э. М. АНТОНЕНКО

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МИКРОСЕЙСМ В КАЗАХСТАНЕ

В статье изучается вопрос сейсмического микрорайонирования с помощью микро-сейсм. Дается закономерность высокочастотных микросейсм в зависимости от различных инженерно-геологических условий, определяющих сейсмический эффект при землетрясениях.

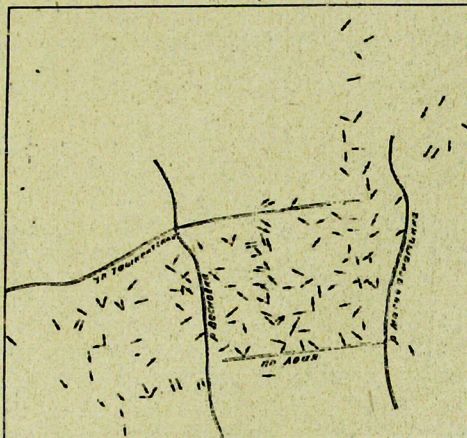
Сейсмологические исследования по микрорайонированию, проводимые Институтом геологических наук Академии наук Казахской ССР с 1957 г., охватили в основном территории городов Алма-Аты, Талгара, Каскелена, расположенных в непосредственной близости от подножия северного склона хребта Заилийского Алатау, относящегося к системе Северного Тянь-Шаня — одной из высокосейсмичных областей Советского Союза как по количеству, так и по интенсивности землетрясений. Аналогичные исследования проведены и в менее сейсмоактивных районах, в 7-балльной зоне сейсмичности, — на территории городов Чимкента и Джамбула.

При проведении микросейсморайонирования, учитывая существующие в природе весьма сложные зависимости сейсмического эффекта землетрясений от инженерно-геологических характеристик грунтов, нами применялась методика комплексных геолого-сейсмологических исследований, получившая развитие в работах С. В. Медведева, А. З. Каца, Г. А. Лямзиной, С. В. Пучкова и др. В частности, микросейсморайонирование в Казахстане включало анализ сейсмологических и инженерно-геологических материалов по району, макросейсмических данных о характере разрушений при катастрофических землетрясениях прошлого и ощутимых землетрясениях ближайших лет; записей близких землетрясений группой временных сейсмических станций, расположенных в различных грунтовых и гидрогеологических условиях, а также анализ детальных площадных записей высокочастотных микросейсм [3, 4 и др.]. Основное внимание при этом уделялось микрорайонированию по микро-сейсмам.

В [1] мы обсуждали вопрос выбора для целей микросейсморайонирования ряда городов Южного Казахстана микросейсм преимущественно 3—9-герцевого частотного диапазона. Кроме того, важно было установить, существуют ли определенные источники этих колебаний или микросейсм создаются повсеместно, то-есть диффузно. При существовании определенных источников, создающих 3—9-герцевые микросейсм, зоны повышенной интенсивности микросейсм в городах будут привязаны к зонам сосредоточения промышленных предприятий, и метод микросейсморайонирования, основанный на сравнительном изучении интенсивности микросейсм, требует проведения специальных наблюдений с целью снятия локального фона, создаваемого ими.

В основу исследований по выявлению источников высокочастотных микросейсм было положено определение в различных точках территорий направлений на источники микросейсм, полученных по разностям времен вступления одной и той же фазы на три идентичных сейсмографа, разнесенных на оптимальное расстояние порядка 25 м по взаимно перпендикулярным направлениям. Контролем идентичности параметров приборов являлась параллельная запись микросейсм в одной точке тремя приборами.

Как показали проведенные работы, направление на источник микросейсм различно в каждой точке наблюдений и непостоянно во времени (фиг. 1). Даже на расстоянии 100—200 м от сильных видимых



Фиг. 1. Направления на источники высокочастотных микросейсм на территории гор. Алма-Аты. Составила Э. М. Антоненко.

источников помех (горных рек, действующих заводов и др.) направление на источник микросейсм чаще всего не совпадает с направлением на промышленные предприятия. Вблизи промышленных установок образуется высокочастотный фон помех порядка 20—30 герц. При удалении же от источника высокочастотных помех, на расстоянии 200—400 м остается постоянный уровень 3—9-герцевых микросейсм, характерный для конкретных грунтовых условий.

Определение направлений на источники микросейсм в 150 точках показали отсутствие постоянного фиксированного источника и подтвердили факт диффузности их возникновения.

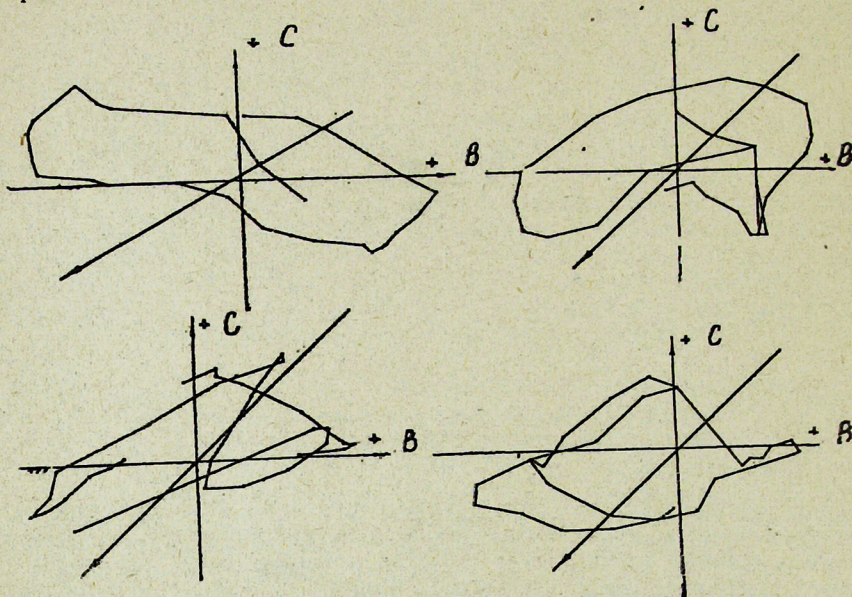
Помимо описанных исследований для выяснения природы микросейсмических колебаний в районе сильного «видимого» источника помех микросейсм записаны трехкомпонентной установкой из ВЭГИК, подключаемых к гальванометрам ГВ-111 в осциллографе ПОБ-12-М. При этом ось максимальной чувствительности одного горизонтального ВЭГИКа ориентировалась по азимуту С—Ю, второго — по азимуту В—З, третий ВЭГИК писал вертикальную компоненту вектора смещения почвы.

На сейсмограммах трехкомпонентной установки выделены колебания с частотой 1—2 герца и колебания с частотой 3—8 герц, осложненные высокочастотными помехами порядка 20—30 герц. Анализ полу-

ченными этими методами сейсмограмм показал, что устойчивыми по амплитуде являются микросейсмы с частотой 3—8 герц. Низкочастотные колебания и высокочастотные помехи крайне несистематичны, непостоянны во времени по амплитуде. Самое же главное — отсутствуют четкие зависимости интенсивности этих микросейсм от грунтовых условий.

По наблюдениям трехкомпонентной установкой определены направления вектора смещения почвы и исследованы закономерности изменения амплитуд и частот сейсмических волн при удалении от видимых источников возбуждения на расстояние до 2000 м (точки наблюдений через 50 м).

Рассмотрение около 200 графиков положения вектора смещения почвы в фиксированные моменты времени также не выявило определенных закономерностей в ориентировке построенных «эллипсов» для 3—9-герцевых микросейсм (фиг. 2). Очевидно, вектор смещения почвы на



Фиг. 2. Графики положения вектора смещения почвы на горизонтальной плоскости в фиксированные моменты времени. Стрелка — направление на промышленное предприятие. Составила Э. М. Антоненко.

этих частотах не имеет постоянного направления, а сильно колеблется, указывая на статистический характер высокочастотных микросейсм и на отсутствие в этом случае определенного источника волн.

Из совокупности полученных экспериментально статистических данных сделан вывод, что регистрируемые высокочастотные микросейсмы не зависят от процессов в источнике, а определяются физическими свойствами и условиями залегания верхних слоев. При этом они должны иметь либо очень удаленный источник, либо источник, распределенный по площади (диффузный источник). Гипотеза удаленного источника, по-видимому, несостоятельна, так как он должен был бы проявиться на меньших расстояниях с большей силой, что не подтверждается экспериментами.

В работе [2] нами обсуждена гипотеза возникновения высокочастотных микросейсм как вынужденных колебаний слоев под действием

внешних сил: 1) на поверхности слоя действует гармоническая внешняя сила $F_0 e^{i\omega t}$; 2) на подошве слоя (или поверхности нижележащего пространства) заданы вертикальные смещения, изменяющиеся по гармоническому закону.

Рассчитано отношение амплитуд микросейсм в двух точках различных инженерно-геологических зон, где пройдены глубокие скважины и имеются разрезы по ним, с физико-механическими характеристиками грунтов. На этих же точках экспериментально определены параметры микросейсм (амплитуда, частота, скорость распространения). Расчет амплитуд по двум точкам в различных инженерно-геологических зонах дает отношение смещений для первого случая $W_2/W_1 \sim 7$, для второго случая — $W_2/W_1 \sim 1,7$. При учете затухания в слое и упругости нижележащей среды $W_2/W_1 \sim 1,3$.

(W_2 — амплитуда микросейсм на грунтах, представленных покровными суглинками, супесями с опесчаненными участками, мощностью до 18 м, залегающими на гравийно-галечнике; грунтовые воды на глубине 5 м.

W_1 — амплитуда на покровных суглинках мощностью 2,5 м, залегающих на валунно-галечниках; грунтовые воды на глубине около 30 м).

Фактическое отношение амплитуд микросейсм, непосредственно определенное по сейсмограммам, было 1,7, что достаточно хорошо согласуется со второй гипотезой и с характеристикой относительной сейсмичности вышеописанных грунтов по инженерно-геологическим данным.

Таким образом, сопоставление рассчитанных отношений амплитуд с определенными экспериментально подтверждает заключение, что микросейсм — вынужденные колебания интерференционного типа, взаимодействующие с колебаниями верхних слоев.

Использование регистрирующих систем с широкополосными, а также с узкоизбирательными частотными характеристиками, обеспечивающими записи смещений почвы, позволило установить, что микросейсм с периодами порядка 0,1—0,4 сек., которые мы называли высокочастотными, являются наиболее стабильными в одних и тех же точках, и в то же время резко меняют свою интенсивность при изменении грунтовых и гидрогеологических условий, влияющих на сейсмический эффект на поверхности при землетрясении. При переходе от «средней» сейсмической категории грунтов к первой или второй амплитуды микросейсм соответственно уменьшаются или увеличиваются в 2—3 раза.

Рассмотрим несколько графиков, полученных по записям микросейсм на территории г. Алма-Аты. На фиг. 3 приведены разрезы по скважинам, к которым приурочены точки наблюдений микросейсм. Анализ записей и графиков показывает связь микросейсм с инженерно-геологическими характеристиками грунтов, определяющими увеличение или уменьшение сейсмического эффекта при землетрясении. На плотных валунно-галечниках конусов выноса при глубоком залегании уровня грунтовых вод зафиксированы небольшие амплитуды микросейсм; интенсивность микросейсм увеличивается с уменьшением глубины залегания уровня грунтовых вод, достигая максимальных значений на водонасыщенных супесчано-суглинистых грунтах аллювиально-пролювиальной равнины. При этом средний и максимальный уровень микросейсм на водонасыщенных супесчано-суглинистых грунтах, относимых к III категории, в 2—2,5 раза выше соответственно среднего и максимального уровня на гравийно-галечниках при глубине залегания уровня грунтовых вод в пределах 8—10 м (II категория). На графиках распределения амплитуд по периодам для водонасыщенных супесчано-су-

линистых грунтов характерно большое число резко выраженных максимумов в довольно широком диапазоне периодов от 0,1 до 0,2—0,3 сек.; графики же распределения периодов в этом диапазоне пологие. На фиг. 4 приведены аналогичные графики.

Максимальная амплитуда микросейсм наблюдалась на водонасыщенных супесчано-суглинистых грунтах, где спектральная кривая характеризуется резко выраженными пиками на периодах 0,3—0,4 сек., а кривая распределения периодов, в общем, пологая. Наоборот, на коренных глинах амплитуда микросейсм минимальна, а ее максимальные значения приходятся на более короткие периоды порядка 0,1—0,14 сек.; спектральная кривая не имеет резко выраженных пиков, но график частота случаев—период имеет острый максимум на периоде порядка 0,1 сек. [6].

В [7] показана зависимость уровня микросейсм от грунтовых условий и представлены спектры, полученные для скальных, галечниковых грунтов и для лессовидных суглинков с различным уровнем грунтовых вод на территории городов Душанбе и Ленинабада. Отмечено, что общий фон микросейсм возрастает с ухудшением свойств грунтов, характеризующих их сейсмичность, то есть уменьшение плотности грунтов, а также повышение уровня залегания грунтовых вод увеличивает фон микросейсм.

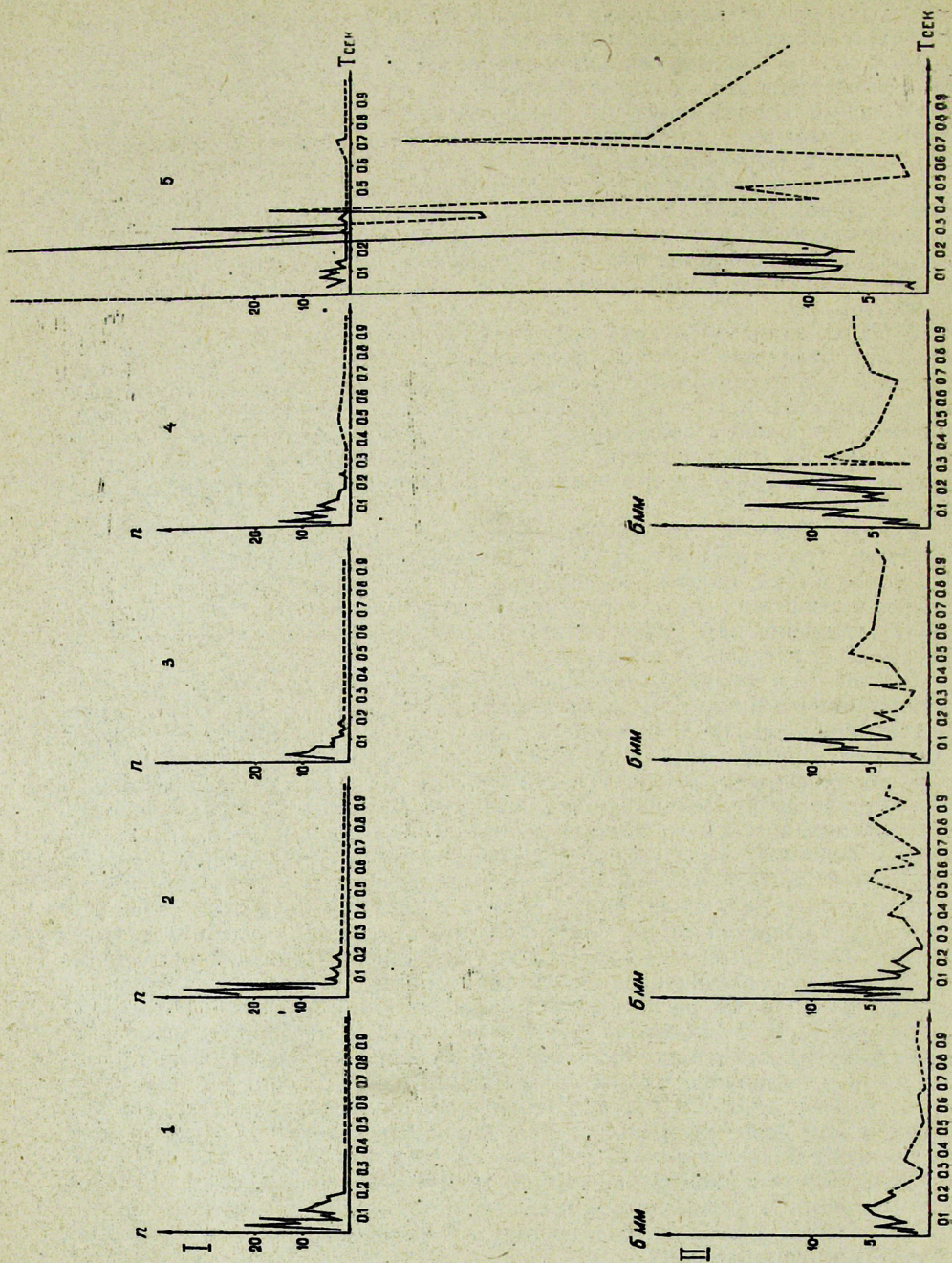
Таким образом, из приведенных примеров записей микросейсм в различных геологических районах явствует, что высокочастотные микросейсм имеют общие закономерности. обусловленные рядом инженерно-геологических характеристик грунтов, приобретающих доминирующее значение при дифференциации сейсмического эффекта в зависимости от грунтовых условий.

В 1964 г. в целях дальнейшего развития методики сейсмического микрорайонирования, при регистрации микросейсм на территории г. Каскелена, помимо узкоизбирательной системы диапазона 3—9 герц, и широкополосной системы УСФ-ГБ-III, применялась, разработанная в Институте физики Земли АН СССР К. К. Запольским, шестиканальная частотно-избирательная сейсмостанция ЧИСС. Она предназначена для изучения частотного состава сейсмических волн и абсолютных измерений основных параметров колебаний грунта: смещений, скоростей и ускорений [5]. Сейсмограф ВЭГИК, подключаемый к гальванометрам ГБ-IV ($p=35$ герц), обеспечивал запись скоростей колебаний почвы.

Что же касается выбора ширины полосы в наборе избирательных каналов ЧИСС, то он тесно связан как со степенью детальности анализа, так и с разрешающей способностью аппаратуры при выделении отдельных волн. Опыт регистрации микросейсм при помощи ЧИСС (исследования К. К. Запольского) показал, что наиболее рациональной является система полосовых октавных фильтров, которая и была применена нами в диапазоне частот 1—2,2 герц; 2,2—4,2 герц; 5,0—8,0 герц; 9,0—17,0 герц; 17,0—29,0 герц. Шестой канал обеспечивал запись микросейсм для всего вышеописанного диапазона частот от 1 до 30 герц при столбобразной частотной характеристике.

Основной задачей исследований с ЧИССом являлось проведение сравнительного анализа интенсивности микросейсм различного частотного диапазона в различных грунтовых и гидрогеологических условиях исследуемой территории.

Решение задачи построения карты инструментального микросейсмрайонирования на основе записей микросейсм в широком частотном диапазоне, от 1 до 30 герц, сопровождалось исследованиями по разработке методики использования естественного сейсмического поля Земли



Фиг. 4. Зависимость между параметрами микросейсм и грунтовыми условиями г. Еревана. I—графики распределения периодов микросейсм на территории г. Еревана. II—графики распределения амплитуд микросейсм (составила Н. К. Карапетян). 1—бальзат, 2—галечник сцементированный, 3—коренные глины, 4—супесчано-суглинистые грунты при глубоком залегании уровня грунтовых вод, 5—водонасыщенные супесчано-суглинистые грунты.

для целей сейсмического микрорайонирования. Остановимся несколько подробнее на результатах исследований.

Перед началом массовых записей на территории г. Каскелена была выбрана система двух взаимно перпендикулярных профилей в так называемых средних грунтовых условиях — на супесчано-суглинистых грунтах при глубоком залегании уровня грунтовых вод. Микросейсмические записывались в начале каждого ежедневного профильного наблюдения на опорной точке, расположенной в том же районе. При дальнейшем вычислении относительного изменения интенсивности микросейсм все данные относились к среднеарифметическому значению интенсивности микросейсм на опорных профилях и опорной точке, которое мы принимали за $A_{оп}$. Такая методика исключает влияние отдельных, трудно учитываемых факторов, приводящих иногда к локальному изменению уровня микросейсм на одной точке во времени.

Точки наблюдений микросейсм — перекрестки городских улиц. Расстояние между точками записи микросейсм около 150—200 м. Обычно при проводимом нами микросейсмрайонировании городов количество точек наблюдений колеблется от 500 до 1000 и более, в зависимости от площади исследования. На территории г. Каскелена произведено 500 наблюдений, включая повторные, аппаратурой регистрации смещений почвы и 500 наблюдений станцией ЧИСС.

Для статистической обработки отдельных сейсмограмм, полученных со станцией ЧИСС в конкретных грунтовых и гидрогеологических условиях, были построены амплитудно-частотные графики для каждой точки наблюдения, для отдельных профилей в пределах одинаковых инженерно-геологических условий с вычислением осредненных спектральных кривых многократных повторных наблюдений на точке, на отдельных профилях и в отдельных инженерно-геологических районах. Такие графики в первом приближении можно рассматривать как грубое подобие формы спектра.

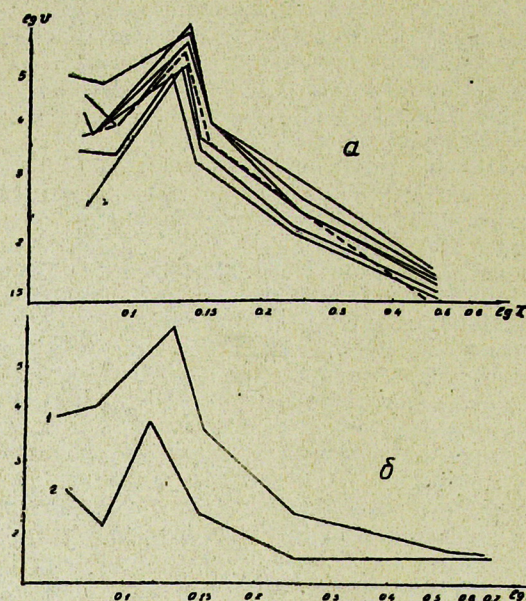
Графики частотного распределения амплитуд построены для различных литологических разностей территории г. Каскелена на грунтах с различной глубиной залегания кровли галечника. Проведена система многократных повторных наблюдений на отдельные точки, также расположенных в различных инженерно-геологических зонах.

В результате анализа всех полученных на территории г. Каскелена записей микросейсм и построенных по ним графиков зависимости амплитуды от частоты сделаны следующие выводы.

1. При сопоставлении графиков зависимости амплитуд микросейсм от периодов, построенных в различных точках одного инженерно-геологического района, а также при системе многократных повторных наблюдений на одной точке установлено, что наиболее постоянными по уровню для конкретных грунтовых и гидрогеологических условий являются микросейсм 3—9-герцевого частотного диапазона, имеющие однозначную зависимость поля амплитуд микросейсм от инженерно-геологических характеристик грунтов, определяющих степень сейсмического эффекта при землетрясениях.

2. Уровень микросейсм более высоких частот порядка 20—30 герц и выше, не может служить достаточно надежным источником информации о степени различия сейсмических характеристик разных типов грунтов, так как на этих частотах решающее значение приобретают действующие промышленные предприятия и другие причины локального характера, приводящие к изменению уровня микросейсм этого частотного диапазона на 200—300% в зависимости от времени наблюдения (фиг. 2).

3. Уровень низкочастотных микросейсм (1—3 герц), хотя и характеризуется стабильностью в одной и той же точке и в пределах одного инженерно-геологического района, также не может служить критерием для сравнительной опасности разных типов грунтов, так как уровень таких низкочастотных микросейсм оказался одинаковым как на более благоприятных в сейсмическом отношении грунтах (на валунно-галечниках), так и на менее благоприятных (суглинках и супесях) (фиг. 5).



Фиг. 5. Спектры микросейсм, а—спектры микросейсм по профилю III на супесчано-суглинистых грунтах г. Каскелена, б—средние спектры микросейсм на мощной толще валунно-галечников (2) и супесчано-суглинистых грунтах (1) г. Каскелена. — — — среднее значение. Составили Э. М. Антоненко и С. А. Прошунина.

Эти положения достаточно хорошо согласуются и подтверждают сделанные в предыдущих методических работах выводы о наибольшей стабильности по уровню микросейсм 3—9-герцевого частотного диапазона, которые к тому же имеют четкие и однозначные зависимости их параметров от инженерно-геологических характеристик грунтов, определяющих силу сейсмического эффекта при землетрясении.

На фиг. 6 приведена карта инструментального микросейсмораионирования территории г. Джамбула, построенная путем экстраполяции данных вычислений приращений балльности по микросейсмам и по землетрясениям в 800 и в 5 точках по 22 землетрясениям соответственно по формуле

$$\Delta n = 3 \lg \frac{A}{A_{\text{оп}}},$$

где Δn — приращение сейсмической балльности на исследуемой точке по отношению к опорной в „средних“ грунтовых условиях; A и $A_{\text{оп}}$ — средняя амплитуда на исследуемой и на опорной точках.

почвы по микросейсам колеблются от $5 \cdot 10^{-2}$ μ в южной части района до $3,5 \cdot 10^{-2}$ μ в северной части.

К этой же зоне отнесена полоса правого берега р. Талас, где грунты представлены валунно-галечником под покровными суглинками небольшой мощности, при глубине залегания грунтовых вод от 10 до 12 м. На возвышенности Тектурмас грунты представлены коренными породами: песчаниками, глинистыми сланцами и известняками палеозойского возраста, которые обычно относятся к I категории грунтов с понижением сейсмичности на 1 балл по отношению к средним грунтовым условиям.

По данным сейсмической станции и маршрутной записи микросейсм (истинные смещения почвы $2,8 \cdot 10^{-2}$ μ), на возвышенности Тектурмас сейсмичность понижается до 6,5 балла. Однако возможность возникновения оползневых явлений верхних рыхлых горизонтов заставляет принять расчетную балльность для возвышенности 7 баллов.

2. Зона расчетной балльности 6 баллов занимает северную часть исследуемой территории. Грунты представлены мощной толщей плотных валунно-галечников, сцементированных конгломератами и перекрытых с поверхности 2—3-метровой толщей суглинков. По инженерно-геологическим изысканиям М. П. Адикова, в этой зоне происходит заглубление уровня грунтовых вод до 20 м и более.

Благоприятные литолого-гидрогеологические условия понижают сейсмический эффект в районе на 0,5—1,0 балл по отношению к опорной точке, расположенной в семибалльной зоне сейсмичности (амплитуда микросейсм на опорной точке А оп. ср. $= 3,6 \cdot 10^{-2}$ μ).

Здесь зафиксированы наименьшие амплитуды микросейсм. Истинные смещения почвы по ним колеблются от $2,2 \cdot 10^{-2}$ μ в южной части до $1,5—2,0 \cdot 10^{-2}$ μ в северной части.

3. Зона расчетной балльности 8 баллов занимает южную часть территории. Грунты представлены переслаивающейся толщей суглинков, супесей и песков переменной мощности, от 2 до 13—15 м; подстилаются валунно-галечником. Уровень залегания грунтовых вод в пределах этой зоны колеблется от 0 до 5 м, в южной и восточной частях они близко подходят к дневной поверхности, от 0 до 1 м, и образуют на юго-востоке и юго-западе заболоченные участки.

Близкое залегание грунтовых вод и наличие переслаивающихся супесчано-суглинистых грунтов переменной мощности повышает сейсмичность грунтов и вызывает увеличение сейсмического эффекта по землетрясениям (приращение балльности $+0,6 \div +1,0$ балл), амплитудам микросейсм и вычисленным по ним истинным смещениям почвы. Истинные смещения почвы по микросейсам здесь в 1,5—2,5 раза больше, чем на опорной точке в средних грунтовых условиях, и колеблются от $5,6 \cdot 10^{-2}$ μ до $7,8 \cdot 10^{-2}$ μ .

К этому же району относится участок восточнее ул. Абая, где в отличие от вышеописанных грунты представлены обводненными валунно-галечниками под покровными суглинками небольшой мощности. Валунно-галечники по сейсмическим характеристикам благоприятны для застройки, но близкое залегание уровня грунтовых вод повышает сейсмичность участка и вызывает увеличение амплитуд микросейсм до $6,5 \cdot 10^{-2}$ μ .

4. Зона, непригодная для застройки по инженерно-геологическим характеристикам, занимает овражную долину арыка Кара-Су и участки, прилегающие к р. Талас. Данные участки характеризуются затоплением низкой поймы р. Талас ежегодными паводками и протекающими

физико-химических процессами, а именно обрушением берегов, оползневыми явлениями, образованием боковых промоин в овражной долине, которые к тому же при землетрясении будут значительно усилены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. М. Антоненко. Некоторые опытные данные изучения высокочастотных микросейсм. Изв. АН КазССР, сер. геол., № 4(49), 1962.
2. Э. М. Антоненко, Е. Ф. Саваренский. О природе высокочастотных микросейсм. Изв. АН КазССР, сер. геол., № 4, 1963.
3. Э. М. Антоненко. Комплексное микросейсморайонирование территории г. Алма-Аты с использованием высокочастотных микросейсм. Диссертация, 1962.
4. Э. М. Антоненко, С. А. Прошунина. Методы микросейсморайонирования и их применение при районировании г. Джамбула. Изв. АН КазССР, сер. геол., № 2, 1964.
5. К. К. Запольский. Измерение уровня и спектрального состава коротко-периодных микросейсм. Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 3, № 10 (117), 1960.
6. Н. К. Карапетян. Определение преобладающих периодов и спектрального состава колебаний почвы на территории г. Еревана. Изв. АН Армянской ССР, сер. техн. наук., т. XIV, № 4, 1961.
7. Л. А. Скорик, З. А. Осьмакова. Опыт применения различных инструментальных методов сейсмического микрорайонирования. Инженерная сейсмология, № 1—2, Душанбе—Ленинкан, 1964.

Институт геологических наук
АН Казахской ССР
