

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ K_{min} ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦИФРОВЫМИ и
АНАЛОГОВЫМИ СТАНЦИЯМИ ТУРКМЕНИСТАНА**

Н.В. Петрова¹, С.С. Абасеев², Г.Ч. Сарыева³

¹Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, npetrova@gsras.ru

²Институт сейсмологии АН Туркменистана, г. Ашхабад, tm.seismology@online.tm

³Государственная сейсмологическая служба АН Туркменистана, г. Ашхабад, gssturkm2010@mail.ru

При планировании систем сейсмологических наблюдений используются карты энергетической представительности – пространственного распределения нижнего предела энергетического класса $K_{n,min}$, начиная с которого инструментальное определение основных параметров землетрясений не имеет пропусков при регистрации n -м количеством сейсмических станций действующей сети. До сих пор при построении карт $K_{n,min}$ в Туркменистане использовалась методика З.И. Арановича и др. [1, 2], разработанная для аналоговых станций. Соответствующая программа, составленная М. Реджеповым, рассчитывала $K_{n,min}$ в каждой точке региона для задаваемой конфигурации сети, минимального числа зарегистрировавших землетрясение сейсмических станций, увеличения и типа приборов, критерия обнаружения полезного сигнала в группе продольных волн. В программе жестко задана зависимость между энергетическим классом K_p и амплитудами смещения в группе продольных и поперечных волн в функции гипоцентральных расстояний для конкретного типа аналоговой аппаратуры (СК, СКМ или ВЭГИК), которая определяет закон затухания сейсмических волн соответствующей шкалы номограммы Т.Г. Раутиан для определения энергетического класса K_p [3, 4]. Аналитическим выражением вышеупомянутой зависимости являются формулы [1, 2]:

$$K_p = 6.3 + 1.9 \lg [(1 + \beta) X_p], \quad (1)$$

$$X_p = X_{p0} (r/r_0)^{-\alpha}, \quad (2)$$

где $\beta = X_s/X_p \approx 4$ – отношение максимальных амплитуд X_s и X_p смещения почвы в группах поперечных и продольных волн для Среднеазиатских землетрясений [5]; X_{p0} – амплитуда смещения почвы в волне P (фаза P_{max}) на референц-сфере радиуса $r_0 = 10$ км; α – эффективный коэффициент затухания амплитуд сейсмических волн, регистрируемых данным типом аппаратуры.

В качестве критерия обнаружения полезного сигнала используется минимальная амплитуда A_{pmin} μ записи P -волн, интерпретируемая на сейсмограмме:

$$A_{pmin} = X_{pmin} \cdot V_{max}, \quad (3)$$

где X_{pmin} – минимальная обнаруживаемая амплитуда смещения почвы в P -волне, зависящая от уровня помех в месте регистрации, V_{max} – увеличение прибора.

Увеличение V_{max} аналоговой станции обычно выбирается так, чтобы фон помех не превышал половины вертикального расстояния между дорожками на сейсмограмме, поэтому обычно принимается, что $A_{pmin} = 0.5$ мм = 500 μ .

Коэффициенты затухания α в выражении (2) для разных типов регистрирующей аппаратуры пи диапазонов расстояний представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты затухания α амплитуд сейсмических волн, регистрируемых данным типом аппаратуры, в зависимости от гипоцентрального расстояния r

| r , км | Тип аппаратуры | | |
|----------|----------------|------|----------|
| | ВЭГИК | СКМ | СК (СКД) |
| 10–100 | 2.05 | 2.00 | 1.60 |
| 100–200 | 1.90 | 1.75 | 1.40 |
| 200–300 | 1.80 | 1.60 | 1.30 |

Данная методика и программа применялись в Туркменистане для оценки эффективности сети сейсмических станций на основных этапах ее развития [6], при выборе оптимального расположения новых сейсмических станций, при построении ежегодных карт $K_{n,min}$, публикуемых в обзорных статьях сейсмичности Копетдага в сборниках «Землетрясения Северной Евразии» за соответствующие годы. При этом отмечалось значительное завышение, на 1–2 единицы класса, уровня энергетической представительности на картах $K_{3,min}$ в изолиниях, по сравнению с $K_{y,min}$, рассчитанным по «левому загибу» графиков повторяемости для отдельных сейсмоактивных районов [7].

С конца 2004 г. на территории Туркменистана началось массовое внедрение цифровых станций типа «Дельта-Геон» со столообразной характеристикой коэффициента чувствительности в интервале 0.3–0.8 с [8]. В связи с этим возникла проблема оценки энергетической представительности землетрясений Копетдагского региона при регистрации их сетью, включающей как аналоговые, так и цифровые станции. Использование с этой целью методики З.И. Арановича и др. [1, 2] представлялось затруднительным из-за неопределенности оценки увеличения сейсмометров цифровых станций: если для аналоговых станций с регистрацией на фотобумагу увеличение постоянно, то для цифровых станций оно легко регулируется. Однако как для цифровых, так и для аналоговых станций возможность визуального определения амплитуды полезного сигнала на сейсмограмме A_{min} и соответствующее увеличение прибора V_{max} ограничиваются уровнем помех X_{min} в месте регистрации. Сравнительный анализ дальности регистрации аналоговой станции «Ванновская» (СКМ-3, $V_{max}=70000$) и цифровой станции «Геокча» системы IRIS, по данным сейсмологических наблюдений в 2002 г., показал, что, несмотря на существенно более широкий динамический диапазон цифровой аппаратуры, фактическая дальность регистрации землетрясений обеими станциями практически одинакова, при примерно равном уровне помех X_{min} в диапазоне периодов 0.1–1.0 с [3]. В этот же диапазон попадают преобладающие периоды P - и S -волн большинства землетрясений Копетдагского региона на эпицентральных расстояниях до 700 км, а также полосы пропускания каналов станции «Геокча» системы IRIS, по записям которых ведется обработка региональных землетрясений.

Таким образом, для включения цифровых станций в расчет энергетической представительности с использованием программы, разработанной для аналоговых станций по методике З.И. Арановича [1, 2], достаточно из уравнения (3) оценить их «аналоговое» увеличение, т.е. увеличение, при котором минимальная амплитуда A_{Pmin} полезного сигнала на записи цифровой станции равна таковой для аналоговых станций. При этом можно принять, что $A_{Pmin}=500 \mu$ [1, 2], или рассчитать среднее значение амплитуд полезного сигнала на сейсмограммах аналоговых станций сети, A_{Pmin} . Минимальную обнаруживаемую амплитуду X_{Pmin} смещения почвы в P -волне можно определить для каждой цифровой станции либо путем прямого измерения максимальных амплитуд спектра помех в диапазоне частот используемых цифровых каналов, либо из экспериментально полученных графиков дальности регистрации с использованием формул (1), (2) и приняв, что X_{Pmin} постоянна в вышеупомянутом диапазоне частот. При этом важно, чтобы для энергетической классификации землетрясений по номограмме Раутиан [3, 4] и оценки представительности использовались цифровые каналы с полосой пропускания, близкой к диапазону частот столообразной части АЧХ приборов типа СК (период низкочастотного среза $T_1=10$ с), СКМ ($T_1=1.5-2$ с) или ВЭГИК ($T_1=0.6-0.8$ с), т.к. именно для аппаратуры с такими характеристиками получены калибровочные кривые, «зашитые» в три соответствующие шкалы расстояний на номограмме Раутиан. В противном случае надо использовать симуляцию каналов типа СК, ВЭГИК или СКМ.

Комплекс программ для расчета карты энергетической представительности $K_{n,min}$ с учетом дальности регистрации включает три подпрограммы (автор – С.С. Абасеев), добавленные к существующему программному комплексу Саотр.ехе обработки первичных данных сейсмических станций Туркменистана и формирования банка сейсмологических данных. Разработанная с этой целью методика приведена в [9].

Первая подпрограмма производит постанционную выборку из Банка сейсмологических данных (БСД) параметров всех землетрясений, зарегистрированных каждой станцией за заданный период времени, включая координаты гипоцентра, групповые энергетические классы K_{gr} , амплитуды P - и S -волн. Групповые энергетические классы K_{gr} равны средним значениям энер-

гетических классов по группе станций, зарегистрировавших землетрясение. По каждой станции формируются текстовые файлы, куда, помимо перечисленных параметров, вносятся рассчитанные подпрограммой гипоцентральные расстояния и станционные энергетические классы K_{st} . При расчете энергетических классов используются сведения об увеличении и полосе пропускания приборов, взятые из файла, содержащего эти характеристики для каждой станции за период 1955–2010 гг., с шагом в один месяц.

Вторая подпрограмма производит расчет функций $K_{min}(r)$ для каждой станции на основе анализа станционных K_{st} и групповых K_{gr} энергетических классов в зависимости от гипоцентральных расстояний. При этом применяется подход, не требующий аппроксимации зависимости $K_{min}(lgr)$ тремя отрезками прямых с разными коэффициентами затухания, как это следует из уравнений (1), (2) и табл. 1. В новом варианте расчета кривая $K_{min}(r)$ трансформируется в прямую линию на графике, шкала расстояний которого по оси абсцисс преобразована в масштаб соответствующей шкалы номограммы Раутиан с помощью специальной функции $f=qLG(r)$, учитывающей закон затухания сейсмических волн для полос пропускания аппаратуры типа ВЭГИК, СКМ или СК (табл. 2). В самом деле при условии постоянства суммы амплитуд (X_p+X_s) во всем диапазоне расстояний, которое следует из предположения о постоянном уровне помех в месте регистрации для соответствующей полосы пропускания прибора (ВЭГИК, СКМ или СК), кривая $K_{min}(r)$ переходит в прямую $K_{min}=K_{min}(qLG)$ на плоскости « $qLG - K_p$ »:

$$K_{min} = a \cdot qLG(r) + b, \tag{4}$$

где $a=3.65$ для всех типов затухания (ВЭГИК, СКМ или СК), а

$$b=1.87 \lg(X_p+X_s) + 2.69. \tag{5}$$

Таблица 2. Функция $f=qLG(r)$ преобразования шкалы гипоцентральных расстояний в масштаб соответствующих шкал ВЭГИК, СКМ и СК номограммы Раутиан

| $r, км$ | $\log_{10}(r)$ | $qLG(r)$ | | |
|---------|----------------|----------|-------|-------|
| | | ВЭГИК | СКМ | СК |
| 5 | 0.699 | 0.699 | 0.699 | 0.699 |
| 10 | 1 | 1.005 | 1.01 | 1.00 |
| 15 | 1.176 | 1.206 | 1.2 | 1.15 |
| 20 | 1.301 | 1.325 | 1.325 | 1.24 |
| 25 | 1.398 | 1.428 | 1.412 | 1.32 |
| 30 | 1.477 | 1.508 | 1.505 | 1.39 |
| 35 | 1.544 | 1.584 | 1.56 | 1.44 |
| 40 | 1.602 | 1.643 | 1.609 | 1.49 |
| 45 | 1.653 | 1.708 | 1.66 | 1.53 |
| 50 | 1.699 | 1.765 | 1.712 | 1.56 |
| 55 | 1.74 | 1.811 | 1.743 | 1.59 |
| 60 | 1.778 | 1.853 | 1.771 | 1.61 |
| 65 | 1.813 | 1.884 | 1.8 | 1.64 |
| 70 | 1.845 | 1.905 | 1.828 | 1.67 |
| 75 | 1.875 | 1.926 | 1.86 | 1.69 |
| 80 | 1.903 | 1.949 | 1.89 | 1.72 |
| 85 | 1.929 | 1.976 | 1.918 | 1.73 |
| 90 | 1.954 | 1.998 | 1.941 | 1.74 |
| 95 | 1.978 | 2.011 | 1.963 | 1.74 |
| 100 | 2 | 2.032 | 1.981 | 1.76 |
| 105 | 2.021 | 2.04 | 1.986 | 1.76 |
| 110 | 2.041 | 2.049 | 1.99 | 1.77 |
| 115 | 2.061 | 2.059 | 1.995 | 1.77 |
| 120 | 2.079 | 2.069 | 1.999 | 1.78 |
| 125 | 2.097 | 2.078 | 2.003 | 1.78 |
| 130 | 2.114 | 2.087 | 2.008 | 1.79 |
| 135 | 2.13 | 2.096 | 2.012 | 1.79 |
| 140 | 2.146 | 2.104 | 2.016 | 1.79 |
| 145 | 2.161 | 2.112 | 2.021 | 1.80 |

| $r, км$ | $\log_{10}(r)$ | $qLG(r)$ | | |
|---------|----------------|----------|-------|------|
| | | ВЭГИК | СКМ | СК |
| 150 | 2.176 | 2.119 | 2.026 | 1.80 |
| 155 | 2.19 | 2.128 | 2.033 | 1.81 |
| 160 | 2.204 | 2.135 | 2.04 | 1.81 |
| 165 | 2.218 | 2.142 | 2.047 | 1.82 |
| 170 | 2.23 | 2.148 | 2.054 | 1.82 |
| 175 | 2.243 | 2.153 | 2.061 | 1.82 |
| 180 | 2.255 | 2.159 | 2.068 | 1.83 |
| 185 | 2.267 | 2.164 | 2.074 | 1.83 |
| 190 | 2.279 | 2.17 | 2.081 | 1.83 |
| 195 | 2.29 | 2.175 | 2.087 | 1.84 |
| 200 | 2.301 | 2.181 | 2.092 | 1.84 |
| 205 | 2.312 | 2.189 | 2.099 | 1.85 |
| 210 | 2.322 | 2.197 | 2.106 | 1.86 |
| 215 | 2.332 | 2.206 | 2.112 | 1.86 |
| 220 | 2.342 | 2.215 | 2.117 | 1.87 |
| 225 | 2.352 | 2.223 | 2.122 | 1.88 |
| 230 | 2.362 | 2.232 | 2.127 | 1.88 |
| 235 | 2.371 | 2.24 | 2.132 | 1.89 |
| 240 | 2.38 | 2.249 | 2.137 | 1.89 |
| 245 | 2.389 | 2.256 | 2.141 | 1.90 |
| 250 | 2.398 | 2.264 | 2.146 | 1.90 |
| 255 | 2.407 | 2.273 | 2.151 | 1.91 |
| 260 | 2.415 | 2.281 | 2.156 | 1.92 |
| 265 | 2.423 | 2.288 | 2.161 | 1.92 |
| 270 | 2.431 | 2.296 | 2.166 | 1.93 |
| 275 | 2.439 | 2.303 | 2.171 | 1.93 |
| 280 | 2.447 | 2.311 | 2.176 | 1.94 |
| 285 | 2.455 | 2.318 | 2.181 | 1.95 |
| 290 | 2.462 | 2.325 | 2.186 | 1.95 |

| $r, км$ | $\log_{10}(r)$ | $qLG(r)$ | | |
|---------|----------------|----------|-------|------|
| | | ВЭГИК | СКМ | СК |
| 295 | 2.47 | 2.333 | 2.191 | 1.96 |
| 300 | 2.477 | 2.341 | 2.196 | 1.97 |
| 305 | 2.484 | 2.35 | 2.202 | 1.97 |
| 310 | 2.491 | 2.36 | 2.208 | 1.97 |
| 315 | 2.498 | 2.371 | 2.215 | 1.98 |
| 320 | 2.505 | 2.381 | 2.221 | 1.98 |
| 325 | 2.512 | 2.391 | 2.227 | 1.99 |
| 330 | 2.519 | 2.402 | 2.233 | 1.99 |
| 335 | 2.525 | 2.412 | 2.239 | 2.00 |
| 340 | 2.532 | 2.422 | 2.244 | 2.00 |
| 345 | 2.538 | 2.432 | 2.25 | 2.01 |
| 350 | 2.544 | 2.441 | 2.255 | 2.01 |
| 355 | 2.55 | 2.452 | 2.261 | 2.02 |
| 360 | 2.556 | 2.463 | 2.266 | 2.03 |
| 365 | 2.562 | 2.473 | 2.271 | 2.03 |
| 370 | 2.568 | 2.483 | 2.276 | 2.04 |
| 375 | 2.574 | 2.493 | 2.281 | 2.04 |
| 380 | 2.58 | 2.503 | 2.285 | 2.05 |
| 385 | 2.586 | 2.514 | 2.29 | 2.06 |
| 390 | 2.591 | 2.524 | 2.295 | 2.06 |
| 395 | 2.597 | 2.534 | 2.299 | 2.07 |
| 400 | 2.602 | 2.545 | 2.304 | 2.08 |
| 405 | 2.608 | 2.551 | 2.309 | 2.08 |
| 410 | 2.613 | 2.558 | 2.315 | 2.09 |
| 415 | 2.618 | 2.565 | 2.32 | 2.10 |
| 420 | 2.623 | 2.571 | 2.326 | 2.11 |
| 425 | 2.628 | 2.578 | 2.331 | 2.12 |
| 430 | 2.634 | 2.584 | 2.337 | 2.13 |
| 435 | 2.639 | 2.591 | 2.342 | 2.14 |

| $r, км$ | $\log_{10}(r)$ | $qLG(r)$ | | |
|---------|----------------|----------|-------|------|
| | | ВЭГИК | СКМ | СК |
| 440 | 2.644 | 2.597 | 2.347 | 2.15 |
| 445 | 2.648 | 2.604 | 2.351 | 2.16 |
| 450 | 2.653 | 2.61 | 2.356 | 2.17 |
| 455 | 2.658 | 2.617 | 2.36 | 2.18 |
| 460 | 2.663 | 2.623 | 2.364 | 2.19 |
| 465 | 2.668 | 2.629 | 2.368 | 2.2 |
| 470 | 2.672 | 2.635 | 2.372 | 2.20 |
| 475 | 2.677 | 2.642 | 2.376 | 2.21 |
| 480 | 2.681 | 2.648 | 2.38 | 2.22 |
| 485 | 2.686 | 2.653 | 2.385 | 2.23 |
| 490 | 2.69 | 2.659 | 2.389 | 2.23 |
| 495 | 2.695 | 2.665 | 2.394 | 2.24 |
| 500 | 2.699 | 2.671 | 2.4 | 2.25 |
| 505 | 2.703 | 2.677 | 2.403 | 2.25 |
| 510 | 2.708 | 2.684 | 2.407 | 2.26 |
| 515 | 2.712 | 2.691 | 2.411 | 2.27 |
| 520 | 2.716 | 2.697 | 2.415 | 2.27 |
| 525 | 2.72 | 2.703 | 2.419 | 2.28 |
| 530 | 2.724 | 2.709 | 2.423 | 2.28 |
| 535 | 2.728 | 2.715 | 2.427 | 2.29 |
| 540 | 2.732 | 2.721 | 2.431 | 2.29 |
| 545 | 2.736 | 2.727 | 2.436 | 2.30 |
| 550 | 2.74 | 2.733 | 2.44 | 2.30 |
| 555 | 2.744 | 2.739 | 2.444 | 2.31 |
| 560 | 2.748 | 2.744 | 2.449 | 2.31 |

| $r, км$ | $\log_{10}(r)$ | $qLG(r)$ | | |
|---------|----------------|----------|-------|------|
| | | ВЭГИК | СКМ | СК |
| 565 | 2.752 | 2.75 | 2.453 | 2.32 |
| 570 | 2.756 | 2.756 | 2.458 | 2.32 |
| 575 | 2.76 | 2.761 | 2.462 | 2.33 |
| 580 | 2.763 | 2.766 | 2.467 | 2.33 |
| 585 | 2.767 | 2.772 | 2.471 | 2.34 |
| 590 | 2.771 | 2.777 | 2.476 | 2.34 |
| 595 | 2.775 | 2.782 | 2.48 | 2.35 |
| 600 | 2.778 | 2.788 | 2.484 | 2.35 |
| 605 | 2.782 | 2.794 | 2.489 | 2.35 |
| 610 | 2.785 | 2.8 | 2.495 | 2.36 |
| 615 | 2.789 | 2.806 | 2.5 | 2.36 |
| 620 | 2.792 | 2.812 | 2.504 | 2.37 |
| 625 | 2.796 | 2.818 | 2.509 | 2.37 |
| 630 | 2.799 | 2.824 | 2.514 | 2.37 |
| 635 | 2.803 | 2.829 | 2.519 | 2.38 |
| 640 | 2.806 | 2.835 | 2.524 | 2.38 |
| 645 | 2.81 | 2.841 | 2.529 | 2.38 |
| 650 | 2.813 | 2.847 | 2.533 | 2.39 |
| 655 | 2.816 | 2.852 | 2.538 | 2.39 |
| 660 | 2.82 | 2.858 | 2.542 | 2.39 |
| 665 | 2.823 | 2.863 | 2.547 | 2.40 |
| 670 | 2.826 | 2.869 | 2.551 | 2.40 |
| 675 | 2.829 | 2.874 | 2.556 | 2.41 |
| 680 | 2.833 | 2.879 | 2.56 | 2.41 |
| 685 | 2.836 | 2.885 | 2.565 | 2.41 |

| $r, км$ | $\log_{10}(r)$ | $qLG(r)$ | | |
|---------|----------------|----------|-------|------|
| | | ВЭГИК | СКМ | СК |
| 690 | 2.839 | 2.89 | 2.569 | 2.42 |
| 695 | 2.842 | 2.895 | 2.573 | 2.42 |
| 700 | 2.845 | 2.9 | 2.578 | 2.42 |
| 705 | 2.848 | 2.906 | 2.582 | 2.43 |
| 710 | 2.851 | 2.911 | 2.587 | 2.43 |
| 715 | 2.854 | 2.917 | 2.592 | 2.43 |
| 720 | 2.857 | 2.922 | 2.597 | 2.44 |
| 725 | 2.86 | 2.928 | 2.601 | 2.44 |
| 730 | 2.863 | 2.933 | 2.606 | 2.44 |
| 735 | 2.866 | 2.938 | 2.61 | 2.45 |
| 740 | 2.869 | 2.943 | 2.615 | 2.45 |
| 745 | 2.872 | 2.948 | 2.619 | 2.45 |
| 750 | 2.875 | 2.953 | 2.623 | 2.45 |
| 755 | 2.878 | 2.957 | 2.628 | 2.46 |
| 760 | 2.881 | 2.962 | 2.632 | 2.46 |
| 765 | 2.884 | 2.966 | 2.636 | 2.46 |
| 770 | 2.887 | 2.97 | 2.64 | 2.46 |
| 775 | 2.889 | 2.974 | 2.644 | 2.46 |
| 780 | 2.892 | 2.978 | 2.648 | 2.47 |
| 785 | 2.895 | 2.982 | 2.652 | 2.47 |
| 790 | 2.898 | 2.985 | 2.656 | 2.47 |
| 795 | 2.9 | 2.989 | 2.66 | 2.47 |
| 800 | 2.903 | 2.992 | 2.663 | 2.47 |
| 805 | 2.906 | 2.995 | 2.667 | 2.47 |
| 810 | 2.909 | 2.998 | 2.672 | 2.48 |

Автоматическое определение функции $K_{min}(r)$ как нижней границы наиболее плотного облака точек (рис. 1), оставляющей случайные точки за пределами основного облака, производится с помощью специального подхода, предложенного С.С. Абасеевым. Он основан на решении проблемы нахождения регулярной границы тени с размытыми контурами. В данном случае таким объектом является замкнутая непрерывная двумерная область (D), каждой точке которой приписано значение плотности ρ (густота тени), полученное путем суммирования опорных гауссовых функций двумерного распределения с дисперсией $\delta K=0.5$ и центрами в точках дискретного множества точек $\{lgr_j, K_j\}$ на плоскости (lgr, K) . Граница здесь определяется как теоретико-множественное объединение особых точек на плоскости (lgr, K) , характеризующихся тем, что:

1) на каждой из них достигается локальный максимум контраста суммарной плотности выше заданного порогового значения η ($\eta=0.1$), полученной интегрированием ρ по соответствующему направлению проектирования φ ;

2) зависимость положений указанных особых точек от угла φ , пробегающего значения от 0 до 2π , является гладкой функцией с минимальной вариацией на всем интервале определения.

Чтобы нивелировать влияние на значения $K_j(r_j)$ точности определения глубин на малых гипоцентральных расстояниях, а также несколько более сильное, чем в номограмме Раутиан, затухание сейсмических волн землетрясений Копетдагского региона на расстояниях более $200 км$, установленное в ходе данной работы, вес $W(\xi)$, приписываемый каждой точке ξ с координатами (lgr_j, K_j) при расчете функции $K_{min}(r)$, задавался в соответствии со следующим правилом:

$$W(\xi) = \begin{cases} 0.25, & r \leq 50 км \\ 0.50, & 50 < r \leq 100 км \\ 1.00, & 100 < r \leq 200 км \\ 2.00, & 200 < r \leq 400 км \\ 4.00, & 400 < r \leq \infty км \end{cases} \quad (6)$$

Результаты расчетов уравнений $K_{\min}(qLG)$ в двух вариантах (для стационарных K_{st} и групповых K_{gr} классов) выводятся в отдельные текстовые файлы для каждой станции. Эти файлы дополняются значениями стационарных отклонений $\delta K_p = K_{st} - K_{gr}$ в зависимости от расстояния. Следует отметить, что приведенные в каталогах землетрясений Копетдага групповые классы K_{gr} определяются без учета стационарных поправок. Значения δK_p вычисляются как для выяснения характера затухания сейсмических волн на территории Копетдагского региона в полосах пропускания приборов типа ВЭГИК, СКМ и СК, так и для учета δK_p интерпретатором при анализе зависимостей $K_{st}(r)$ с целью определения уравнения $K_{\min}(r)$. После необходимых вычислений производится массовое формирование *bmp*-файлов, содержащих соответствующие растровые изображения графиков $K_{st}(r)$ и $K_{gr}(r)$ в логарифмическом масштабе по оси абсцисс, с выводом на каждый график контура $K_{\min}(r)$ и суммы амплитуд P - и S -волн ($X_p + X_s$), рассчитанной согласно формулам (4) и (5). Поскольку автоматический выбор контура $K_{\min}(r)$ в некоторых случаях неоднозначен, предусмотрена возможность его коррекции интерпретатором путем вертикального переноса, для чего на графике (рис. 1) показаны также контуры $K_{\min}(r) + 1.0$, $K_{\min}(r) \pm 0.5$ (рис. 1).

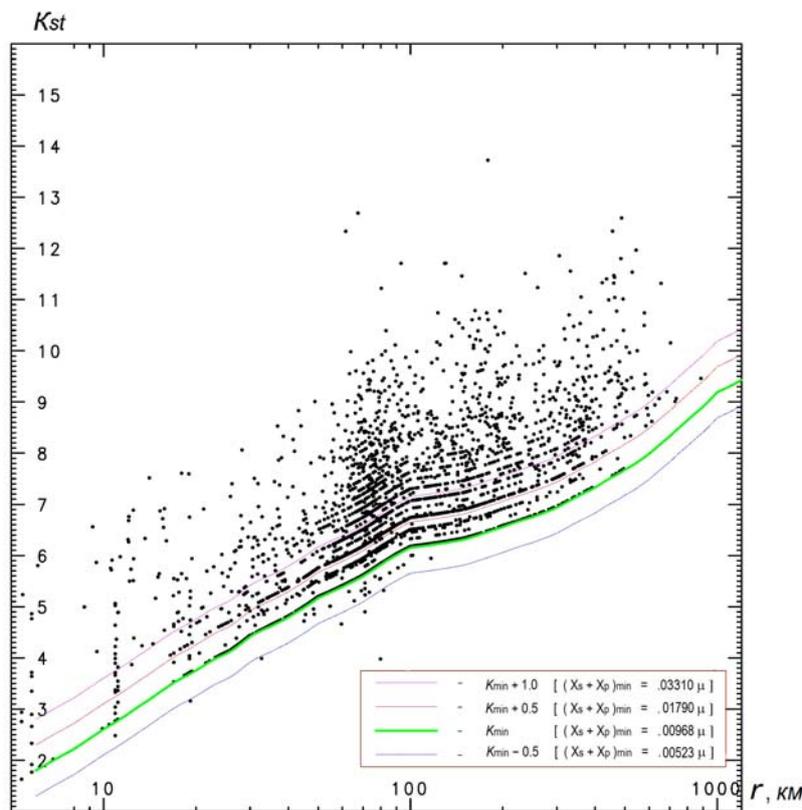


Рис. 1. Зависимость стационарных энергетических классов K_{st} по записям станции «Ванновская» СКМ от гипоцентрального расстояния, и автоматически рассчитанный контур надежной регистрации $K_{\min}(r)$, для коррекции которого интерпретатором показаны также контуры $K_{\min}(r) \pm 0.5$ и $K_{\min}(r) + 1.0$ (в правом нижнем углу графика для каждого контура указаны соответствующие значения суммы амплитуд P - и S -волн, $X_p + X_s$)

Третья подпрограмма рассчитывает карты $K_{n,\min}$ с использованием полученных для каждой станции зависимостей типа (4). При этом вводными параметрами являются координаты регистрирующих станций и свободный член b из уравнения (4), поскольку постоянный для всех типов аппаратуры наклон a графиков $K_{\min}(qLG)$, равный $a=3.65$, учитывается в программе.

Анализ данных об отношениях $\beta = X_s/X_p$ амплитуд смещений в S - и P -волнах, полученных из Банка сейсмологических данных (БСД), подтвердил, что в среднем для большинства сейсмических станций Туркменистана, действовавших в 2005–2007 гг., $\beta \approx 4$, как и в [5].

При анализе графиков зависимости энергетических классов K_p от гипоцентральных расстояний r , проведенном отдельно для стационарных K_{st} и групповых K_{gr} классов (рис. 2), выяс-

нилось, что для землетрясений с $K_p = K_{\min}(r) \pm 1$ в БСД содержатся только максимальные амплитуды S -волн, т.е. сумма ($X_p + X_s$), удовлетворяющая уравнениям (4) и (5), фактически равна амплитудам S -волн X_s , различимым на фоне помех данной станции. При этом амплитуды $X_p = X_s/4$ должны превышать фон помех данной станции, согласно (4) и (5), при энергетических классах $K_p > K_{\min} + \Delta K$, где $\Delta K = 1.87 \cdot \lg(4) = 1.13$. Как видно из рис. 2, контур $\{K_{\min}(r) + 1.13\}$ действительно соответствует дальности регистрации по P -волне землетрясений, для которых в БСД приведены максимальные амплитуды P -волн.

Таким образом, сейсмические станции Туркменистана, находящиеся на предельных расстояниях регистрации, участвуют в локализации гипоцентра землетрясения и определении его энергетического класса только по амплитудам и временам пробега S -волн. Действительно, в практике обработки землетрясений Государственной сейсмологической службой АН Туркменистана для определения эпицентра достаточно одной сейсмической станции, на сейсмограмме которой выделяются вступления P - и S -волн, и минимум двух станций со вступлениями S -волн. Это условие заложено в новую программу расчета энергетической представительности K_{\min} по дальности регистрации n -м числом станций.

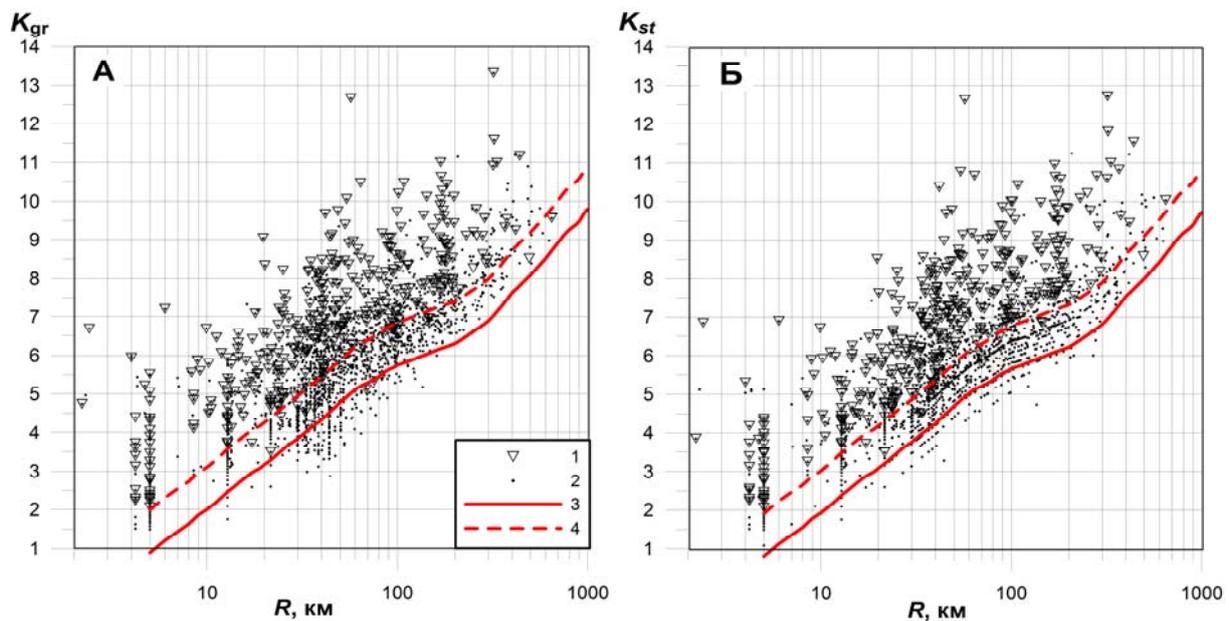


Рис. 2. Графики зависимости от гипоцентральных расстояний r групповых (А) и станционных (Б) энергетических классов землетрясений 2006 г., зарегистрированных станцией «Гермаб» Дельта-Геон

1 – значения $K_{gr}(r)$ и $K_{st}(r)$ землетрясений, для которых в БСД приведены максимальные амплитуды P - и S -волн; 2 – то же для землетрясений с приведенными в БСД амплитудами S -волн и отсутствующими амплитудами P -волн; 3 – контур $K_{\min}(r)$ для всех точек; 4 – контур $\{K_{\min}(r) + 1.13\}$ для землетрясений с приведенными в БСД амплитудами P -волн.

С помощью нового пакета программ *Caromp* отдельно для станционных и групповых классов рассчитаны уравнения $K_{\min, st}(r)$ и $K_{\min, gr}(r)$ для каждой аналоговой и цифровой станций, действовавших на территории Туркменистана с 2005 по 2007 г. В течение этого периода амплитудно-частотные характеристики приборов на сейсмических станциях Туркменистана (табл. 3 в [10]) практически не менялись, что дает основание для использования соответствующих параметров дальности регистрации для построения единой карты энергетической представительности за эти годы. Используя известные увеличения V_{\max} аналоговых станций и рассчитанные для них подпрограммой оценки дальности регистрации минимальные амплитуды смещения почвы в S -волне $X_{S\min}$, удовлетворяющие уравнениям (4) и (5), для каждой аналоговой станции были определены минимальные визуально обнаруживаемые амплитуды полезного сигнала $A_{S\min} = X_{S\min} \cdot V_{\max}$ (табл. 3). Их средние значения, $A_{S\min} = 419 \mu$ для станционных классов и $A_{S\min} = 415 \mu$ для групповых близки к $A_{P\min} = 500 \mu$, принятому в [1, 2] в качестве критерия полезного сигнала. Для контроля правильности расчетов и пределов ошибок в табл. 3 приведены также расчет-

ные увеличения аналоговых станций $V'_{\max} = \overline{A_{S_{\min}}} / X_{S_{\min}} = 420 / X_{S_{\min}}$ и их отклонения от реальных увеличений dV'_{\max} в процентах. Среднее абсолютных значений dV'_{\max} составляет 25% как для станционных, так и для групповых классов, а стандартные отклонения – 37–38%. В целом соответствие реальных и расчетных увеличений удовлетворительное, за исключением расчетных увеличений для станции «Каракала», $\overline{V'_{\max}} = 10871$, которые более чем вдвое превышают реальное увеличение этой станции $V_{\max} = 5000$.

Таблица 3. Расчетные значения минимальных обнаруживаемых амплитуд $X_{S_{\min}}$, амплитуд полезного сигнала $A_{S_{\min}}$, увеличений V'_{\max} и коэффициентов b в уравнениях (4, 5), полученные из графиков $K_{\min, st}(r)$, $K_{\min, gr}(r)$ и реальных увеличений V_{\max} аналоговых станций Туркменистана в 2005–2007 гг.

| Станция | | Координаты | | V_{\max} | Станционный класс $K_{st}(r)$ | | | | Групповой класс $K_{gr}(r)$ | | | | $\overline{V'_{\max}}$ | b | Число данных N |
|-----------|-----|---------------------|---------------------|------------|-------------------------------|---------------------|-------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|-------------|-------------------|------------------------|-------|------------------|
| Код в БСД | Код | φ° N | λ° E | | $X_{S_{\min}}$ μ | $A_{S_{\min}}$ μ | V'_{\max} | dV'_{\max} % | $X_{S_{\min}}$ μ | $A_{S_{\min}}$ μ | V'_{\max} | dV'_{\max} % | | | |
| 1 | Ашх | 37.96 | 58.37 | 6000 | 0.04828 | 290 | 8700 | 45 | 0.0555 | 333 | 7477 | 25 | 8089 | 0.34 | 780 |
| 2 | Ван | 37.95 | 58.11 | 50000 | 0.0098 | 490 | 42857 | -14 | 0.01072 | 536 | 38713 | -23 | 40785 | -0.99 | 3592 |
| 4 | Крк | 38.44 | 56.27 | 5000 | 0.04039 | 202 | 10399 | 108 | 0.03659 | 183 | 11342 | 127 | 10871 | 0 | 1614 |
| 6 | Ктр | 37.68 | 54.77 | 5000 | 0.08735 | 437 | 4808 | -4 | 0.08054 | 403 | 5153 | 3 | 4981 | 0.64 | 559 |
| 8 | Нбд | 39.51 | 54.39 | 5070 | 0.05839 | 296 | 7193 | 42 | 0.06739 | 342 | 6158 | 21 | 6676 | 0.68 | 490 |
| 9 | Кшт | 37.46 | 59.49 | 10000 | 0.03758 | 376 | 11178 | 12 | 0.02958 | 296 | 14032 | 40 | 12605 | -0.15 | 583 |
| 10 | Мнш | 37.72 | 58.61 | 30000 | 0.00836 | 251 | 50224 | 67 | 0.01269 | 381 | 32703 | 9 | 41464 | -0.86 | 2609 |
| 12 | Овд | 38.11 | 58.36 | 5000 | 0.09614 | 481 | 4369 | -13 | 0.05706 | 285 | 7273 | 45 | 5821 | 0.38 | 241 |
| 13 | Срн | 39.99 | 58.83 | 50000 | 0.00988 | 494 | 42532 | -15 | 0.00658 | 329 | 63118 | 26 | 52825 | -1.33 | 696 |
| 14 | Крс | 40.04 | 53.00 | 30000 | 0.02399 | 720 | 17509 | -42 | 0.01654 | 496 | 25094 | -16 | 21302 | -0.64 | 910 |
| 15 | Чгл | 40.78 | 55.38 | 40000 | 0.00978 | 391 | 42945 | 7 | 0.0099 | 396 | 41919 | 5 | 42432 | -1.06 | 830 |
| 22 | Срх | 36.53 | 61.21 | 13000 | 0.04641 | 603 | 9049 | -30 | 0.02653 | 345 | 15646 | 20 | 12347 | -0.15 | 179 |
| 28 | Грд | 37.80 | 66.05 | 10000 | 0.03771 | 377 | 11137 | 11 | 0.0583 | 583 | 7118 | -29 | 9128 | 0.18 | 76 |
| 30 | Днт | 39.07 | 55.17 | 30000 | 0.01471 | 441 | 28547 | -5 | 0.01561 | 468 | 26581 | -11 | 27564 | -0.67 | 1030 |
| 34 | Сун | 38.50 | 57.30 | 9000 | 0.0471 | 424 | 8917 | -1 | 0.04305 | 387 | 9640 | 7 | 9279 | 0.13 | 944 |
| 36 | Кшк | 35.27 | 62.31 | 10000 | 0.04186 | 419 | 10033 | 0 | 0.0389 | 389 | 10668 | 7 | 10351 | -0.11 | 111 |
| 37 | Кар | 37.56 | 66.43 | 20000 | 0.0177 | 354 | 23729 | 19 | 0.0273 | 546 | 15201 | -24 | 19465 | -0.33 | 91 |
| 38 | Куг | 37.91 | 66.48 | 10000 | 0.05456 | 546 | 7698 | -23 | 0.0652 | 652 | 6365 | -36 | 7031 | 0.47 | 77 |
| 39 | Ккс | 38.20 | 56.90 | 40000 | 0.00914 | 366 | 45964 | 15 | 0.01349 | 540 | 30769 | -23 | 38367 | -0.82 | 1903 |

В табл. 4 представлены «аналоговые» увеличения цифровых станций $V'_{\max} = \overline{A_{S_{\min}}} / X_{S_{\min}}$, рассчитанные для станционных и групповых классов при $\overline{A_{S_{\min}}} = 420$ μ. Цифровые станции типа Дельта-Геон («Гермаб»-Грм, «Гаудан»-Гдн, «Маньш-2»-Мн2, «Бахарден»-Бхн в табл. 4) калибровались на территории сейсмической станции «Ашхабад», станционное отклонение δK_p которой относительно среднего по сети энергетического класса близко к $\delta K_p = 0$. Путем сравнения установлена идентичность амплитуд одних и тех же сейсмических событий на записях вышеупомянутых станций и их близкие к нулю станционные отклонения [8], поэтому можно использовать для оценки их увеличения амплитуды $A_{S_{\min}}$, полученные из графиков $K_{\min}(r)$ как для групповых, так и для станционных классов. В отличие от станций типа Дельта-Геон, станционное отклонение цифровой сейсмической станции «Геокча» («Гкч») системы IRIS относительно группового класса велико ($\delta K_p = +0.8$ по небольшому числу данных за 2005–2007 гг.), поэтому энергетические классы по записям этой станции обычно не включаются в расчет группового класса K_{gr} . Причина такого завышения пока не ясна, что не позволяет без предварительного набора достаточного числа данных и уточнения значений δK_p применять описанную методику для расчета увеличения V'_{\max} этой станции с использованием станционных классов. Поэтому соответствующая ячейка в табл. 4 не заполнена.

Значения V_{\max} для аналоговых станций из табл. 3 и средние увеличения $\overline{V'_{\max}}$ из табл. 4, полученные на основе графиков $K_{\min, st}(r)$ и $K_{\min, gr}(r)$ для станционных и групповых классов цифровых станций, были использованы при построении карты энергетической представительности

$K_{3,\min}$ за 2005–2007 гг. по традиционной методике З.И. Арановича и др. [1, 2] с помощью программы М. Реджепова, где заданы слишком жесткие условия регистрации землетрясения минимум тремя станциями, на сейсмограммах которых амплитуды P -волн превышают фон помех. Поскольку полученная карта (рис. 3) завышает реальный уровень энергетической представительности землетрясений Копетдагского региона, по сравнению со значениями $K_{y,\min}$ из табл. 3 в [10], а также на основе данных рис. 2, в программу было внесено условие расчета $K_{n,\min}$ при локализации эпицентра землетрясения n -м числом станций, на записях которых амплитуды S -волн превышают фон помех, а на одной из них также различимы амплитуды P -волн.

Таблица 4. Амплитуды полезного сигнала $X_{S,\min}$, расчетные увеличения V'_{\max} и коэффициенты b из уравнений (4, 5) для цифровых станций Туркменистана в 2005–2007 гг.

| Код станции | Координаты | | Станционный класс $K_{st}(r)$ | | Групповой класс $K_{gr}(r)$ | | $\overline{V'_{\max}}$ | N | b |
|-------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|------------------------|------|-------|
| | φ°, N | λ°, E | $X_{S,\min}, \mu$ | V'_{\max} | $X_{S,\min}, \mu$ | V'_{\max} | | | |
| Грм | 38.01 | 57.75 | 0.00426 | 98534 | 0.00472 | 87924 | 93229 | 4039 | -1.66 |
| Гдн | 37.67 | 58.35 | 0.00458 | 91803 | 0.00462 | 89819 | 90811 | 578 | -1.68 |
| Мн2 | 37.72 | 58.61 | 0.00465 | 90323 | 0.00645 | 64341 | 77332 | 276 | -1.41 |
| Гкч | 37.93 | 58.12 | – | – | 0.00673 | 61630 | 61630 | 2497 | -1.37 |
| Бхн | 38.21 | 57.23 | 0.00753 | 55814 | 0.00646 | 64217 | 60015 | 1153 | -1.41 |

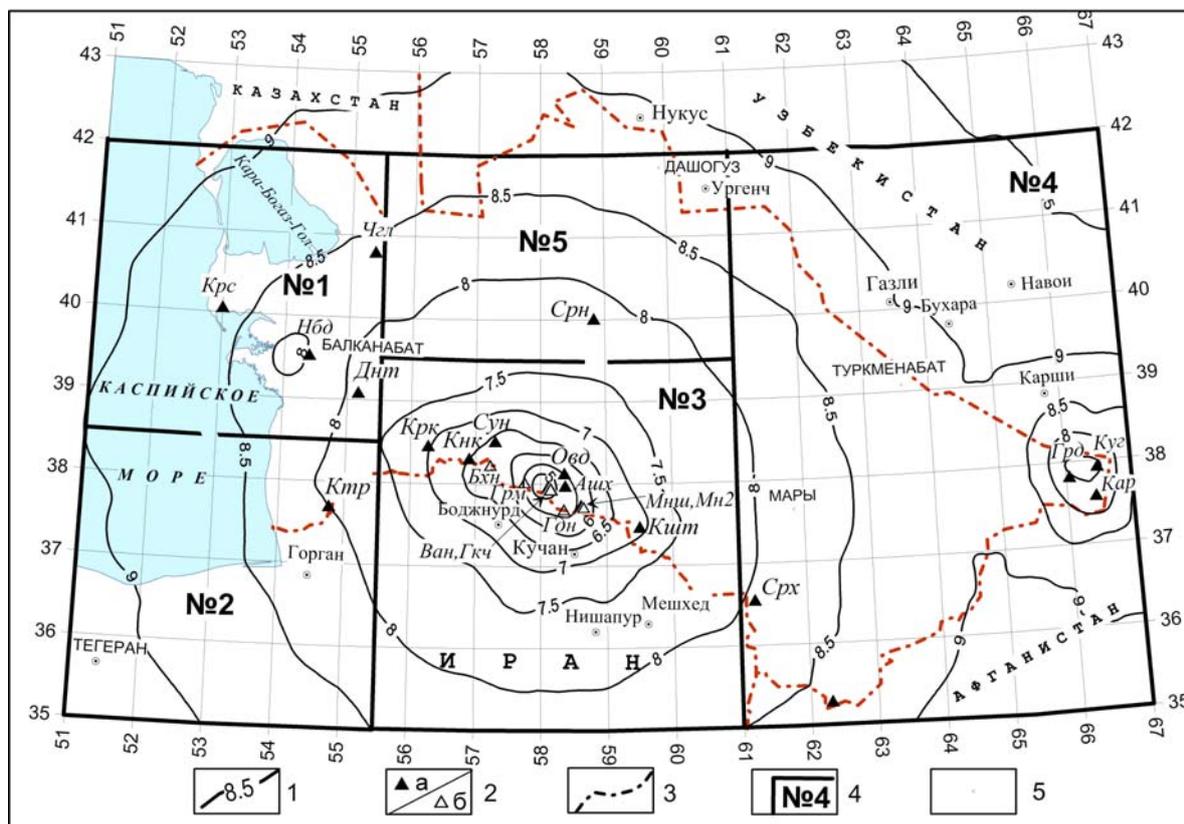


Рис. 3. Карта энергетической представительности $K_{3,\min}$ землетрясений Копетдага в 2005–2007 гг. по методике Арановича [1, 2]

1 – изолиния $K_{3,\min}$; 2 – сейсмическая станция: а – аналоговая, б – цифровая; 3 – государственная граница; 4 – граница и номер района; 5 – город.

Указанная опция включена в третью подпрограмму расчета энергетической представительности по дальности регистрации цифровых и аналоговых станций [9], входящую в комплекс *Caromr* обработки данных БСД. Исходными параметрами, помимо координат станций и типа используемой шкалы номограммы Раутиан (ВЭГИК, СКМ или СК), являются коэффици-

енты b из уравнений (4), которые выводятся после расчета и построения графиков $K_{\min}(r)$ в текстовые файлы для каждой станции. Полученная с помощью этого подхода карта $K_{3,\min}$, представленная на рис. 4, лучше, чем карта на рис. 3, соответствует реальной дальности регистрации сейсмических станций Туркменистана и энергетической представительности землетрясений Копетдага в различных сейсмоактивных районах. При этом она хорошо согласуется с также приведенной на рис. 4 картой $K_{3,\min}$, рассчитанной с помощью модифицированной программы М. Реджепова [11], в которую также внесена вышеупомянутая опция.

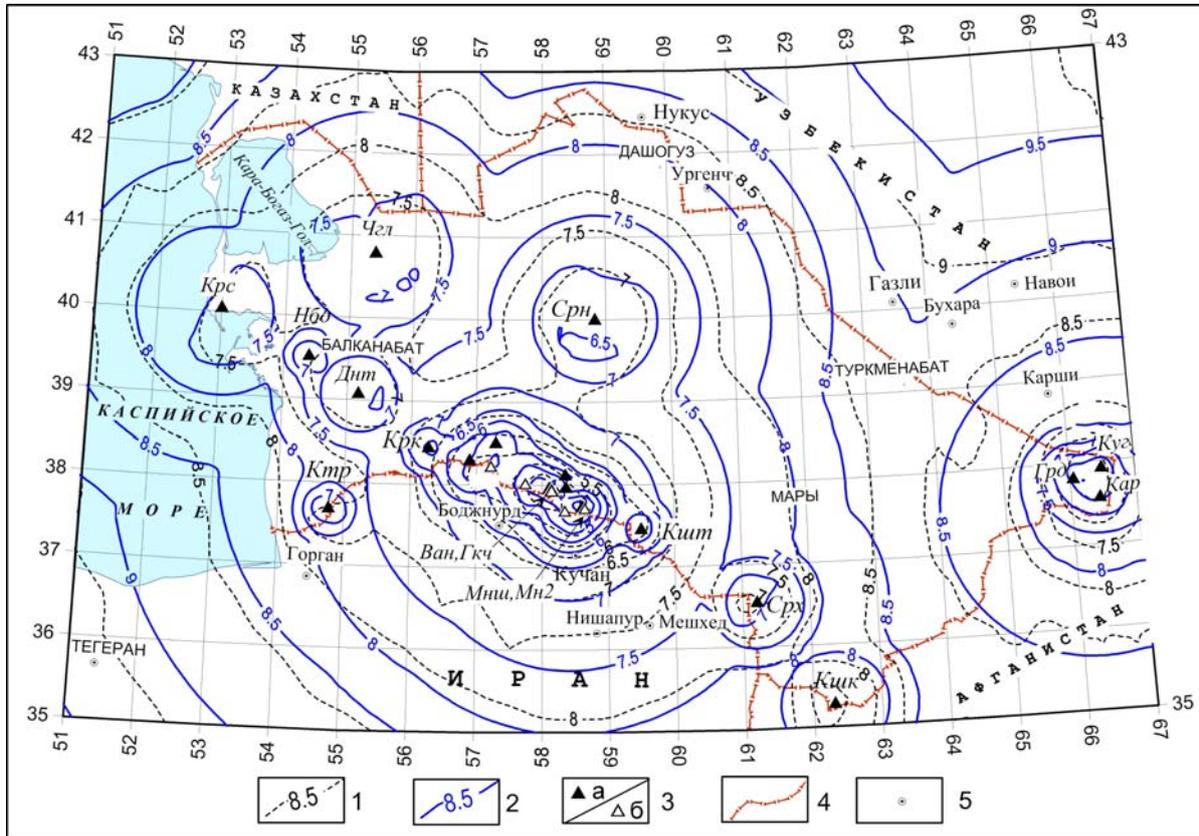


Рис. 4. Сравнение карт энергетической представительности землетрясений Копетдага $K_{3,\min}$ за 2005–2007 гг., рассчитанных с помощью модифицированной программы М. Реджепова [11] и программы С.С. Абасеева [12], при условии превышения максимальными амплитудами S -волн фона помех минимум на трех станциях, на одной из которых различимы также амплитуды P -волн

1 – изолинии $K_{3,\min}$, рассчитанные по программе М. Реджепова [11]; 2 – то же, по программе С.С. Абасеева [12]; 3 – сейсмическая станция: а – аналоговая, б – цифровая; 4 – государственная граница; 5 – город.

Таким образом, для расчета энергетической представительности при регистрации землетрясений смешанной сетью, состоящей из аналоговых и цифровых станций, предлагаются два подхода. Первый основан на использовании модифицированной методики [1, 2] и соответствующей программы [11], разработанной для аналоговых станций, с включением в исходный файл, наряду с увеличениями аналоговых станций, «аналоговых увеличений» цифровых станций. Они могут быть найдены из уравнения (3), приняв, что минимальные амплитуды записи, интерпретируемые на сейсмограмме, примерно равны $A_{\min} \cong 500 \mu$, а минимальные обнаруживаемые амплитуды смещения почвы X_{\min} можно определить для каждой станции либо путем прямого измерения максимальной амплитуды фона помех, либо по дальности регистрации станции при условии, что значения X_{\min} постоянны в полосе пропускания приборов. Второй подход включен в программный комплекс *Caromr* обработки сейсмологических данных из БСД в Туркменистане и основан на определении коэффициентов b в уравнениях (4) и (5) зависимости $K_{\min}(qLG)$. Для регионов, где, как и в Туркменистане, однозначная локализация эпицентра осуществляется минимум тремя станциями, по записям, по крайней мере, одной из ко-

торых должны быть определены вступления P - и S -волн, а по записям других – вступления S -волн, условие превышения соответствующим типом волн фона помех должно быть внесено в программу расчета карты $K_{n,min}$. Так, в [11] приведена программа М. Реджепова, модифицированная для учета этого условия при расчете карт представительности С.С. Абасеевым. Это же условие присутствует в подпрограмме расчета карт K_{min} программного комплекса *Caromp*. Сравнение карт, построенных двумя вышеописанными способами (рис. 4), доказывает применимость обоих подходов.

Л и т е р а т у р а

1. Аранович З.И., Артиков Т.У. Расчет эффективности сети региональных сейсмических станций Средней Азии // Методика и результаты оценки эффективности региональных систем сейсмических наблюдений. – Тбилиси: Мецниереба, 1980. – С. 78–96.
2. Аранович З.И., Ахалбедашвили А.М., Гоцадзе О.Д., Деканосидзе Ц.А. Методика расчета эффективности сети сейсмических станций на примере Кавказа // Вопросы оптимизации и автоматизации сейсмологических наблюдений. – Тбилиси: Мецниереба, 1977. – С. 27–55.
3. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
4. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // Труды ИФЗ АН СССР. – № 32 (199). – М.: Наука, 1964. – С. 72–98.
5. Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф., Курочкина Р.И. и др. Основные экспериментальные закономерности динамики сейсмических волн. – М.: Наука, 1968. – 287 с.
6. Гаипов Б.Н., Петрова Н.В. Анализ эффективности региональной сети сейсмических станций Туркменистана на основных этапах ее развития // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Ашхабадского землетрясения – Ашхабад: Ылым, 1999. – С. 70–78.
7. Гаипов Б.Н., Петрова Н.В., Безменова Л.В., Сарыева Г.Ч. Копетдаг // Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 128–143.
8. Гаипов Б.Н., Петрова Н.В., Сарыева Г.Ч. Состояние и перспективы применения цифровых сейсмических станций на территории Туркменистана // Материалы Международной конференции «Научные основы внедрения новых технологий в эпоху нового возрождения». – Ашхабад: Ылым, 2009. – С. 156–158.
9. Петрова Н.В., Абасеев С.С. Методика и программа расчета дальности регистрации сейсмических станций на территории Туркменистана // Материалы Международной научной конференции «Наука, техника и инновационные технологии в эпоху великого возрождения». – Ашхабад: Ылым, 2011. – С. 70–72.
10. Петрова Н.В., Аннаорова Т.А., Безменова Л.В., Сарыева Г.Ч., Чарыев М.М. Копетдаг. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
11. Реджепов М. Программа расчета энергетической представительности по модифицированному алгоритму З.И. Арановича и др. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
12. Абасеев. С.С. Программы расчета дальности и представительности регистрации землетрясений, включенные в программный комплекс *Caromp* обработки данных БСД Государственной сейсмологической службы Туркменистана. – Ашхабад: Фонды ГСС АНТ, 2011. – 17 с.