

**ВКЛАД Ю.А. МЕЩЕРЯКОВА В РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ****(к 80-летию со дня рождения)**

Природа мать!
Когда б таких людей
Ты иногда не посылала миру,
Заглохла б нива жизни!

Н.А. Некрасов

Юрий Александрович Мещеряков принадлежит к плеяде людей замечательных. Природа наградила его даром настоящего ученого – предвидеть пути развития Науки. Достоинно восхищения то, как в конце 60-х годов, во времена бурного и безуспешного поиска путей решения проблемы прогноза землетрясений, Юрий Александрович прозорливо указал на единственный путь, который может привести к заветной цели [1, 2]. Он писал:

"Включение исследований движений земной коры в комплексе работ по прогнозу землетрясений теоретически оправдано. Так называемые медленные (вековые) движения земной коры, выявляемые геодезическими методами, и быстрые (сейсмические) имеют общий источник происхождения.

Между этими двумя видами движений, несомненно, существует закономерная связь в пространстве и во времени. Сущность и формы такой связи еще далеко не познаны, но можно выказать твердую уверенность в том, что выявление существующих в этом отношении закономерностей позволит по особенностям медленных движений земной коры судить о сейсмическом режиме той или иной территории" [2, стр. 94].

Его предсказание сбылось: в середине 80-х годов оно было теоретически обосновано и подтверждено экспериментальными данными [3, 4]. Уверенность Юрия Александровича служила путеводной звездой в поисках прямого и достоверного признака подготовки очага землетрясения.

Произошедшие в последнее десятилетие разрушительные и унесшие множество жизней не предсказанные сильные землетрясения (Спитакское 1988 г., Калифорнийское 1989 г., Японское и Сахалинское 1995 г., Турецкие и Тайваньские 1999 г. и др.) со всей очевидностью показали, что существующие системы прогноза своего назначения не оправдывают. Этот отражающий печальную реальность вывод не противоречит оценкам возможностей современных систем прогноза, сделанных В.И. Кейлис-Бороком [5]. Согласно его оценкам эти системы способны обеспечить следующие сугубо вероятностные прогнозы: 1) точность прогноза места готовящегося землетрясения – сотни километров; 2) точность определения возможной энергии землетрясения – шесть порядков; 3) точность прогноза времени – годы. Совершенно очевидно, что практической ценности такой прогноз не имеет; кроме того, он порождает и ложную тревогу, и ложную успокоенность. Именно это случилось в 1989 году в Калифорнии, когда сильное землетрясение ожидали в Паркфилде (300 км от Сан-Франциско), а оно произошло под Сан-Франциско.

Таким образом, проблема прогноза землетрясений, поглотившая уже достаточно времени и средств, на сегодняшний день пребывает в состоянии глубокого кризиса, причины которого кроются в самой концепции реализации рассматриваемой проблемы.

Как известно, существующая стратегия реализации прогноза землетрясений жиж- дется на идеях обнаружения очага и отслеживания происходящих в нем процессов не прямыми методами, а с помощью решения обратных задач по разрозненным косвен- ным признакам – аномалиям, порождаемым готовящимся очагом в различных полях: сейсмических, деформационных, гидрогеологических, геохимических, электромагнит- ных и др.

Возможно, в однородной изотропной среде местоположение готовящегося очага землетрясения действительно можно было бы точно локализовать по подобным аномалиям, однако реальная среда не однородна и не изотропна, и, к тому же еще, имеет мозаичное блоковое строение. Благодаря этим качествам реальной среды при подготовке очага землетрясения возникает эффект кажущегося существенного увели- чения его размеров, т.е. рождаемые готовящимся очагом аномалии возникают в объе- ме горных пород намного превосходящем размеры действительного очага.

Существенную лепту в этот процесс могут вносить линейно-вытянутые тектони- ческие структуры (разломы и другие нарушения в земной коре) с ослабленными механическими свойствами пород. Эти структуры выполняют роль своеобразных каналов распространения на значительные расстояния различных аномалий. Так при- мерно за два с половиной года до Сарыкамышского землетрясения 1970 г. ($M = 6,8$) на одном из разломов в Алма-Ате (180 м от эпицентра) были зафиксированы вертикаль- ные смещения со средней скоростью до 35 мм/год. Общая сумма измеренных смеще- ний на разломе составила величину около 60 мм, которая была полностью сброшена после землетрясения [6]. Размеры площади проявления аномальных деформаций могут в десятки раз превышать истинные размеры очага.

Как уже отмечалось выше, долговременные интенсивные исследования показали полную бесперспективность попыток решить проблему прогноза землетрясений мето- дами отслеживания многочисленных косвенных аномалий. Эта методика не позволяет достоверно и точно определять местоположения готовящихся очагов землетрясений, а, следовательно, и отслеживать с необходимой для решаемой проблемы детальностью процессы подготовки и разрушения этих очагов. "Разрушительное Спитакское землетрясение 1988 г. инициировало попытку проанализировать состояние дел с крат- косрочным прогнозом и породило определенные сомнения в эффективности ретроспек- тивного анализа разнородных параметров в качестве предвестников землетрясений" [7, стр. 23].

Итак, "стратегия аномалий" возложенных на нее надежд не оправдала. Однако это не означает, что проблема прогноза землетрясений неразрешима: выполненные в пос- леднее время исследования это подтвердили. Стало совершенно очевидно, что теперь исследования нужно было сосредоточить на поиске прямых указателей, прямых при- знаков подготовки очагов землетрясений.

Так как подготовка и реализация землетрясения являются в первую очередь меха- ническими процессами (накопление и сброс упругих сейсмогенных деформаций), то именно здесь и следовало искать прямые признаки. С этой целью была разработана деформационная модель подготовки очага сильного корового землетрясения, из кото- рой однозначно следовало, что признаком подготовки очага землетрясения является накапливаемый во времени упругий изгиб горных пород в этом очаге [3, 4].

От имевшихся к тому времени моделей предложенную деформационную модель отличает то, что ее исходные положения основаны на достоверных эксперимен- тальных данных. Речь идет о закономерностях смещений геодезических пунктов в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений, определенных геодезическими измерениями, выполненными до и после сильных коровых землетрясений. Установ- ленные по геодезическим данным закономерности смещений земной поверхности пол- ностью соответствуют таковым из теоретических соображений [4].

При разработке деформационной модели были учтены следующие современные представления: о внутреннем строении земной коры и литосферы, их тектоническом строении и происходящих в них тектонических процессах; о существовании активных

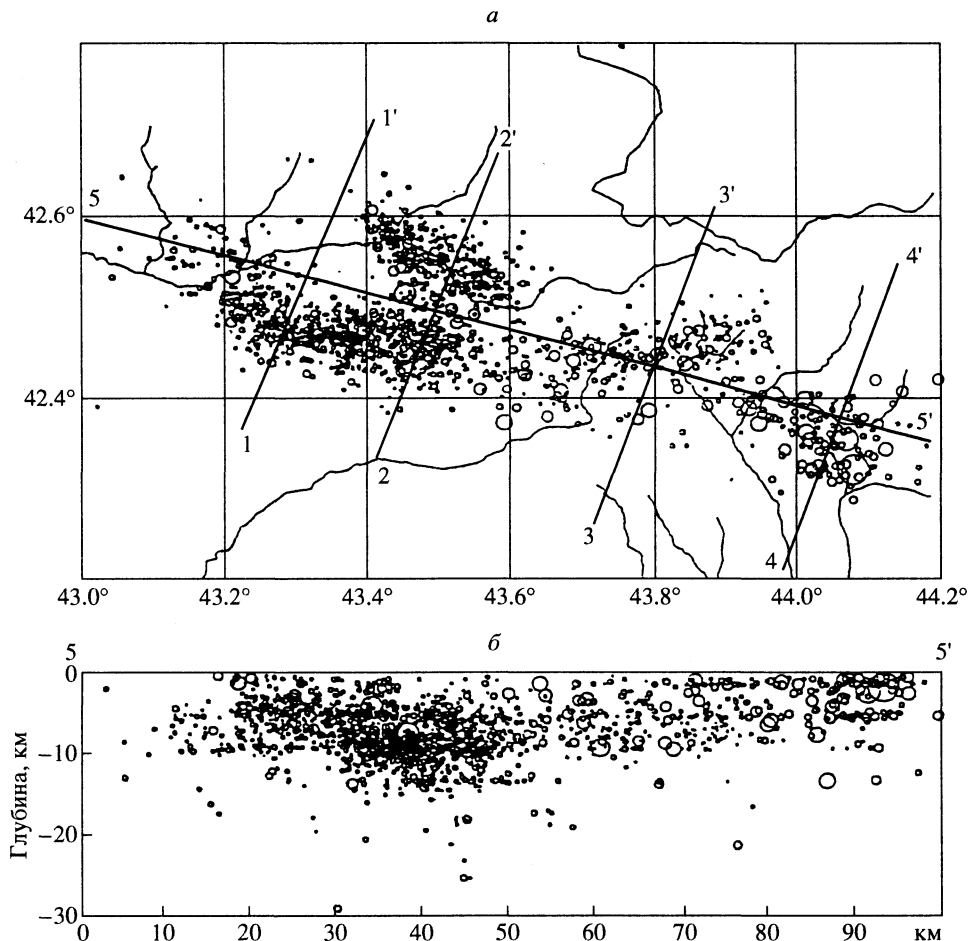


Рис. 1. Карта эпицентров Рачинского землетрясения (а) и вертикальный разрез по линии 5–5' (б)
На секущую плоскость спроецированы все сейсмические события за афтершоковый период (по [20]).
Глубина основного толчка 10 км

глубинных разломов; о реологической расслоенности коры и литосферы в вертикальном разрезе и существовании в земной коре сейсмогенного слоя; о пространственном распределении сильных коровых землетрясений – их приуроченности к глубинным разломам в пределах сейсмогенного слоя земной коры и многое другое.

Результатом анализа совокупности перечисленных сведений и данных явилась концепция формирования очагов сильных землетрясений, которая и позволила предложить деформационную модель очага. Существенные, определяющие черты и признаки этой модели представлены в следующих выводах.

1. Ответственным за коровую сейсмичность является самый верхний, так называемый сейсмогенный слой земной коры мощностью 10–25 км, породы которого способны накапливать значительные упругие напряжения и хрупко разрушаться (порождать землетрясения) при достижении предела их прочности [8–12].

2. Очаги сильных коровых землетрясений генетически связаны с рассекающими сейсмогенный слой активными тектоническими разломами [13–17].

3. Причины зарождения, созревания и разрушения таких очагов в тех или иных участках разломов обуславливаются или полным прекращением или существенным

уменьшением тектонических смещений на этих участках. Г.А. Гамбурцев такие участки назвал "спайками". Чем длиннее "спайка", тем больше сейсмической энергии она способна накопить [14].

4. При подготовке очага сильного корового землетрясения сейсмогенные деформации накапливаются по всей толщине сейсмогенного "упругого" слоя земной коры: от земной поверхности и до его подошвы (10–25 км) [18–20]. Это находит подтверждение в пространственном распределении афтершоков сильных коровых землетрясений, которое показано на примере Рачинского землетрясения 1993 года [20]. Из рис. 1 однозначно следует, что после землетрясения упругие напряжения снимались, а, следовательно, до землетрясения и накапливались, лишь в самой верхней части земной коры и что наиболее однородное поле афтершоков занимает интервал глубин от нуля до десяти километров.

5. Вопреки укоренившимся представлениям о том, что сейсмогенной деформацией является упругий однородный сдвиг [13, 17, 21–23] установлено, что в действительности такая деформация представляет собой неоднородный, но закономерно изменяющийся в пространстве упругий сдвиг, т.е. упругий изгиб горных пород в готовящемся очаге землетрясения [4, 24–26].

6. Накапливаемый горными породами готовящегося очага землетрясения упругий сейсмогенный изгиб распределяется в этом очаге экспоненциально: он максимален в центральной части сейсмогенной зоны и быстро убывает в обе стороны от этой зоны к периферийным, боковым частям очага. В общем случае упругая деформационная кривая имеет в очаге вид двух отрезков, симметричных относительно центральной точки. Максимальное изменение кривизны кривой совпадает с ортогональным к поверхности разлома направлением (рис. 2).

7. В очагах сильных землетрясений ($M > 7$) упругий изгиб проникает в тела контактирующих по сейсмогенному разлому блоков на 10–25 км, т.е. полная ширина зоны накопления изгиба (ширина очага) составляет 20–50 км. Максимальные упругие смещения горных пород в очагах сильных землетрясений измеряются метрами.

8. Земная поверхность, являющаяся верхней границей готовящегося очага сильного корового землетрясения, также подвергается нарастающему во времени закономерному изгибу. Изгибание самых верхних частей земной коры над очагами землетрясений подтверждается экспериментальными данными – закономерными смещениями геодезических пунктов в эпицентральных областях сильных коровых землетрясений [13, 17, 24, 27, 28] (рис. 2, 3).

9. Нарастающий во времени закономерный изгиб земной поверхности является единственным достоверным признаком, однозначно указывающим на то, что в исследуемой части сейсмогенной зоны идет процесс накопления сейсмогенных деформаций [3].

Здесь крайне уместно отметить следующее. В свое время Ю.А. Мещеряков предложил различать в сейсмогенных районах "три вида движений земной коры: α – медленные, вековые движения, проявляющиеся в течение длительного "спокойного" периода между вспышками сейсмической активности; β – "аномальные" движения, проявляющиеся в период подготовки землетрясения; γ – движения, вызванные самим землетрясением [2, стр. 96].

С рассмотренных нами позиций перечисленные типы движений соответствуют следующим фазам смещений и деформаций земной коры в очаге землетрясения: α – фаза пластического скольжения (крип), фаза нормальных тектонических движений в сейсмогенном разломе; β – фаза накопления упругих сейсмогенных напряжений, то есть фаза подготовки очага землетрясения, порождаемая нарушением ритма нормальных тектонических движений на том или ином участке сейсмогенного разлома; γ – фаза разрушения, сброса накопленных в очаге предельных сейсмогенных напряжений.

Далее читаем у Ю.А. Мещерякова: "Для распознавания признаков движений – предвестников землетрясений – и оценки их продолжительности необходима разработ-

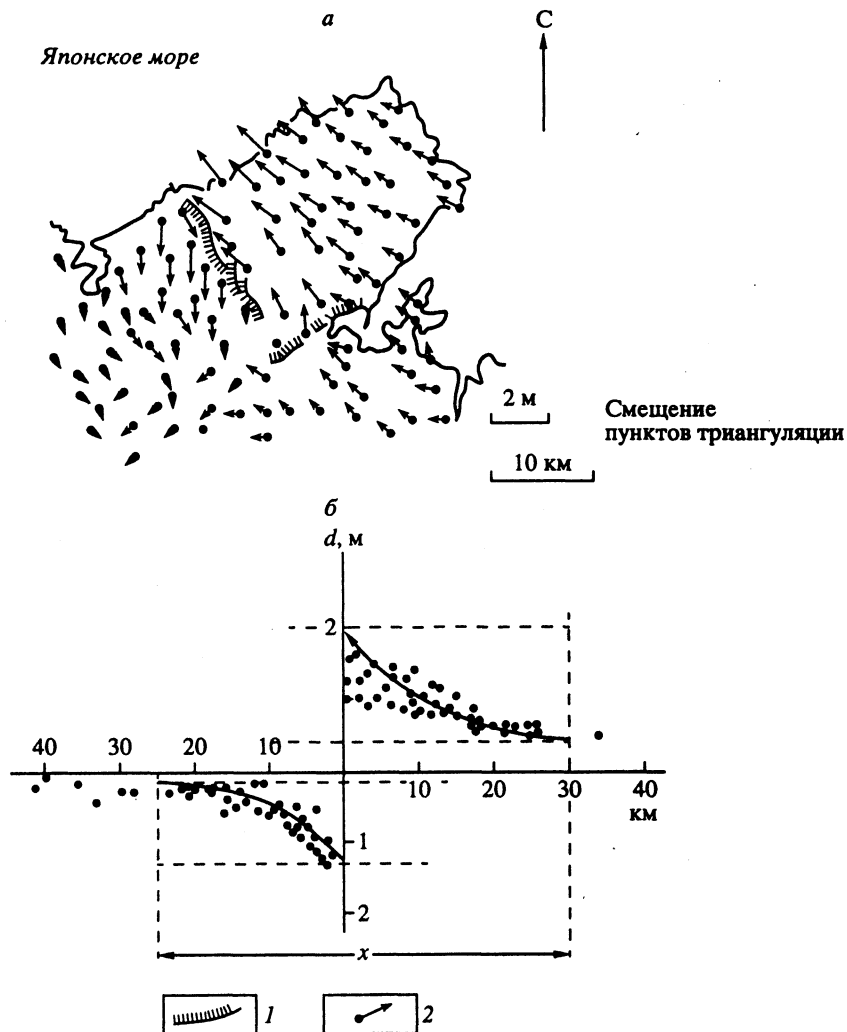


Рис. 2. Векторы горизонтальных смещений пунктов триангуляции, порожденных подвижкой по разлому Гомура при землетрясении Танго 1927 года (а) и график этих смещений, изображенных на вертикальной плоскости, перпендикулярной к разлому Гомура (б). x – ширина очага землетрясения Танго
1 – разлом, 2 – векторы смещений. По горизонтальной оси – удаления от разлома, по вертикальной – смещения пунктов

ка многих теоретических вопросов на базе большого фактического материала" [2, стр. 102]. Теперь нам известны ответы на оба эти вовемя заданные вопроса: признаки движений предвестников землетрясений – это рассмотренные выше "мещеряковские" β -движения, вопрос об оценке продолжительности которых подробно рассмотрен в литературе [4]. Современные исследования позволили определить и те параметры деформационного поля очага, знание которых необходимо и достаточно для осуществления точного прогноза места очага и его максимально возможной силы.

С полной определенностью можно говорить о том, что единственным ключом к достоверному прогнозу места готовящегося очага является закономерный изгиб земной поверхности, максимальный в ортогональном к разлому направлении. Реальный путь к прогнозу максимально возможной силы будущего землетрясения лежит через определение размеров участка земной поверхности закономерно деформируемого подготов-

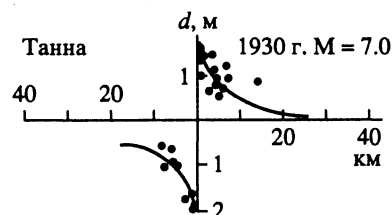
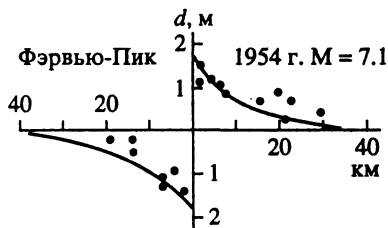
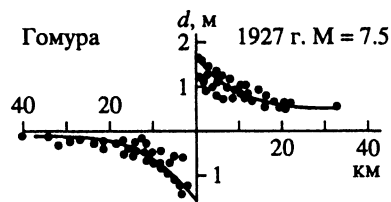
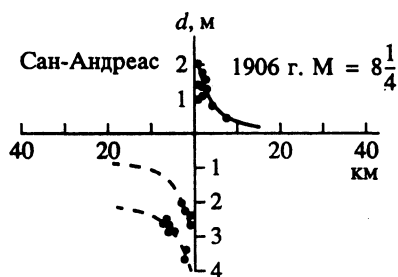


Рис. 3. Графики горизонтальных смещений геодезических пунктов для нескольких сильных землетрясений
Условные обозначения см. рис. 2

кой землетрясения, т.е. путем непосредственного измерения на земной поверхности длины и ширины очага, а при соблюдении определенных условий также и величины накопленных сейсмогенных деформаций.

Речь идет о необходимости измерения величин смещений (абсолютных деформаций) в единой системе координат на площадях с линейными размерами в десятки километров. Это требование диктуется в первую очередь размерами ширины очагов землетрясений: 20–50 км. Выполнение этого требования обязательно, так как гарантировать определение действительного интегрального вида искомой кривой можно лишь при условии измерения относительно единого начала всех необходимых для ее построения элементов. Решить данную задачу можно посредством метода, обладающего следующими тремя разрешениями:

1. Масштабным (пространственным) – векторы смещений точек наблюдений должны определяться в единой системе координат на значительных базах – до десятков километров.

2. Разрешением вида деформирования – система наблюдаемых точек должна обеспечивать уверенное определение формы пространственной деформационной кривой на всем ее протяжении.

3. Точностным – достаточной точностью измерения взаимных смещений точек можно считать величину 10^{-6} . Такая точность достаточна для достоверной регистрации накапливаемых над готовящимися очагами упругих смещений, абсолютные величины которых для сильных землетрясений измеряются дециметрами и метрами. Предельная сдвиговая деформация горных пород в очагах сильных землетрясений заключена между величинами 10^{-3} – 10^{-4} .

Как известно, среди методов, используемых для прогноза землетрясений, имеются три, которые позволяют определить смещения и деформации горных пород: сейсмоло-

гический, деформационный геофизический (тензодатчики, деформометры, наклонометры) и геодезический.

Сейсмологический метод непригоден для таких определений по своей физической сути. Из всей совокупности движений он фиксирует лишь разрозненные сейсмические подвижки, возникающие при быстром сбросе той или иной порции предварительно накопленных в горных породах упругих сейсмогенных деформаций. Совершенно очевидно, что эти "разрядные" подвижки фиксировать процесс накопления сейсмогенных деформаций не могут. Если бы сейсмологическому методу было доступно определение точного местоположения готовящегося очага, то эта задача была бы уже давно успешно решена – этим занимаются много и упорно.

Имеющий очень большие точностные возможности деформационный геофизический метод пока не обладает ни масштабным разрешением, ни разрешением по виду деформирования и поэтому для указанной цели также непригоден. Ситуация может измениться к лучшему в случае создания системы наблюдений, которые позволят фиксировать либо закономерно изменяющийся сдвиг, либо нарастающий во времени упругий сейсмогенный изгиб горных пород на базах в километры и десятки километров.

Из перечисленных методов лишь геодезический обладает всеми разрешениями, позволяющими реализовать точный прогноз места и силы готовящегося сильного землетрясения. Современные высокоточные геодезические методы позволяют определять вертикальные и горизонтальные компоненты смещений на базах в километры и более с точностью до нескольких единиц седьмого знака. Разрешение вида деформирования можно обеспечить с помощью специальных геодезических построений, имеющих достаточное количество пунктов наблюдений (датчиков смещений), взаимное расположение которых в пространстве соответствует решаемой задаче.

Итак, для осуществления точного прогноза места очага и его силы необходимо обнаружить участок сейсмогенной зоны, испытывающий закономерное упругое изгибание и определить его размеры. Именно решению этой задачи должны быть подчинены вид и размеры специальных геодезических построений, количество пунктов и их взаимное расположение в этих построениях.

Так как ширина очаговой зоны в ортогональном к сейсмогенному разлому направлении составляет 20–50 км, то размеры геодезического построения должны быть порядка 30–60 км. Если сейсмогенная зона совпадает с зоной раздела между сушей и водой (например, на Камчатке или на черноморском побережье Кавказа), то можно ограничиться созданием прогнозных геодезических построений только на суше, т.е. для поиска деформационного предвестника использовать лишь половину ширины сейсмогенной зоны.

Что касается размеров построения вдоль разломной зоны, то, конечно же, было бы идеальным иметь специальные геодезические сети, полностью перекрывающие сейсмогенные зоны. Однако если это даже и будет возможно в будущем, то на начальном этапе исследований можно ограничиться рассекающими сейсмогенную зону сравнительно узкими построениями – от прямолинейной (створ) или слабо изогнутой линии и до того или иного вида геодезической сети шириной около километра.

Следует отметить, что в арсенале геодезии имеется достаточное количество различных форм геодезических построений, которые могут быть взяты на вооружение при создании подобных сетей. Эти формы следует выбирать как с учетом необходимой точности определения величин смещений пунктов, так и с учетом других условий: рельеф, используемая аппаратура, методики измерений. Для мониторинга профилей пригодны как наземные, так и космические методы геодезии. Если предлагаемая методика использования деформационно-геодезического направления получит в проблеме права гражданства, то это откроет широкую дорогу для творчества – методология, методы, аппаратура, принципы дискретного и непрерывного мониторинга и др. Дальновидные ученые в Армении уже приступают к реализации этих идей [29].

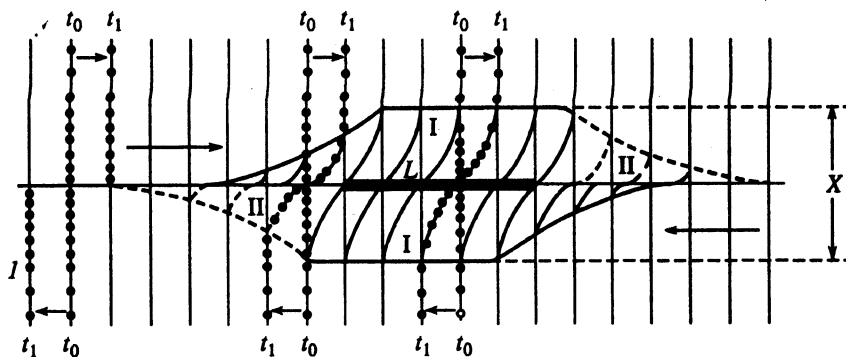


Рис. 4. Деформационная модель очага землетрясения

I – зона сжатия; II – зона растяжения; L – участок прекращения движений по разлому ("спайка"); X – ширина очага; линии с точками – геодезические профили; t_0 и t_1 – положения геодезического профиля в моменты t_0 и t_1

Назовем указанные построения геодезическими прогнозными профилями, а для наглядности будем изображать их прямыми линиями (рис. 4). Для уверенного определения вида деформирования исследуемого участка земной поверхности профиль должен иметь большую густоту пунктов. Причем частота расположения пунктов вдоль профиля может быть переменной: в наиболее деформируемой центральной части сейсмогенной зоны пункты нужно располагать чаще, а к краям зоны их можно размещать реже.

С учетом экспоненциального вида искомой упругой кривой в центральной части зоны, примерно на пяти километрах ее длины, расстояния между смежными пунктами целесообразно ограничить 500-ми метрами. Дальше эти расстояния могут постепенно возрастать, но не быть более одного километра. Эти усредненные характеристики должны корректироваться для каждого конкретного профиля.

Такое расположение пунктов можно считать оптимальным для фиксации как нарастающего во времени упругого изгиба (максимального в зоне сейсмического шва и вблизи него), так и сбрасываемых напряжений (деформаций), возникающих в очаге при его разрушении, что, как будет показано ниже, необходимо для осуществления прогноза времени.

Повторные измерения на таком прогнозном профиле позволят определять действительный вид деформирования исследуемого участка сейсмогенной зоны и тем самым отвечать на вопрос – готовится или нет в этом месте очаг землетрясения.

Так как сила землетрясения функционально связана с размерами очага, то, к прогнозу силы готовящегося землетрясения можно подойти через определение размеров его очага. Длину и ширину очага можно определять геодезическим методом, создав на всем протяжении исследуемой сейсмогенной зоны ту или иную комбинацию прогнозных профилей, рассчитанную на достоверное обнаружение готовящихся очагов. Такие комбинации прогнозных профилей можно назвать "геодезическими прогнозными системами". Принципы размещения профилей в прогнозных системах и расчет частоты их опроса описаны достаточно подробно [4].

Итак, из трех главных вопросов прогноза землетрясений: где?, какой силы? и когда? ответы получены на два первых и теперь остановимся на последнем.

Начать рассмотрение этого вопроса следует со следующих соображений Г.А. Гамбурцева: "Изыскание методов прогноза времени землетрясений следует направить в первую очередь в сторону поиска механических предвестников землетрясений. Такие поиски могут быть успешными только в случае, если они будут основываться на глубоком изучении всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных районов" [30, стр. 306].

Из этого следует, что исследования необходимо сосредоточить на установлении закономерностей протекания механических процессов, подготавливающих магистральный разрыв очага (сильное землетрясение). Совершенно очевидно, что устанавливать эти закономерности следует на основе изучения тонкой структуры как всей совокупности смещений и деформаций земной поверхности, так и сейсмических подвижек (форшоков) в начавшем разрушаться очаге.

Использование деформационных геофизических методов в проблеме прогноза землетрясений особенно перспективно именно в этой стадии жизни очага землетрясения, так как данные непрерывных высокоточных наблюдений за деформационными процессами в сочетании с детальными сейсмическими наблюдениями могут обеспечить "глубокое изучение всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных разломов" [30, стр. 306].

Также перспективно использование сейсмических методов для слежения за напряженным состоянием горных пород в очаге с помощью искусственных источников его просвечивания [31]. Однако на современной, по существу все еще начальной стадии исследований по прогнозу землетрясений, их целесообразно продолжать с использованием широкого комплекса самых разных методов. Помимо всего прочего это позволит получить сравнительные характеристики информативности различных методов и оценить перспективы их использования.

Следует особо подчеркнуть значение заблаговременного прогноза места и силы готовящегося очага землетрясения для прогноза времени его реализации. Только в этом случае возможно проводить комплексные исследования не в случайно или недостаточно обоснованно выбранных местах, а непосредственно над реально существующим очагом готовящегося землетрясения, что позволит осуществлять регистрацию даже очень слабых и быстро затухающих с удалением от их источника аномалий, порождаемых этим очагом. В этом случае, еще даже и до установления законов разрушения очагов, можно рассчитывать на то, что коллективное поведение аномалий в различных полях явится достаточным объективным показателем приближающейся катастрофы и позволит своевременно принять необходимые меры безопасности.

Заблаговременное обнаружение готовящихся очагов землетрясений позволит создавать компактные комплексные системы наблюдений с разрешением достаточным для изучения тонкой структуры развития процессов разрушения в этих очагах, т.е. для определения закономерностей протекания этих процессов. А это и будет прямой путь к прогнозу времени.

Таким образом, наиболее обоснованной и перспективной можно считать следующую стратегию прогнозных исследований. На выбранных по тем или иным практическим (города, АЭС, химические заводы и др.) или научным соображениям участках сейсмогенных зон создаются геодезические прогнозные сети, способные решать задачу прогнозов места и силы землетрясения, а затем в местах обнаруженных готовящихся очагов организуются нацеленные на прогноз времени наблюдательные сети комплексных исследований.

Как известно геодезический метод уже давно используется с целью поисков предвестников землетрясений, но ощутимых результатов пока нет, и поэтому часто возникает вполне закономерный вопрос – чем обусловлена такая ситуация. Ответ на этот вопрос следует искать в истории формирования концепций прогноза землетрясений.

Обоснованные представления о тектоническом происхождении сильных землетрясений появились во второй половине прошлого века и тогда же была угадана значимость геодезического метода в решении проблемы их прогноза. Есть веские основания считать, что первым в России, а может быть и вообще первым, предложил и стал использовать метод повторных геодезических измерений для изучения тектонических движений в связи с сейсмичностью выдающийся русский ученый И.В. Мушкетов. Еще в 1887 году, сразу после Верненской сейсмической катастрофы, им для указанных целей был проложен нивелирный ход от г. Верного (Алма-Ата) до берегов озера

Иссык-Куль. По его настоянию в 1900 году были выполнены повторные триангуляционные измерения в эпицентральной зоне Ахалкалакского землетрясения 1899 года.

К сожалению, блестящий научный путь И.В. Мушкетова был прерван ранней смертью в 1902 году, но его идея использования повторных геодезических измерений для изучения землетрясений вскоре была реализована в США.

В 1906 г. в Калифорнии случилась сейсмическая катастрофа ($M=8,3$), при которой общая длина сдвинувшегося при землетрясении участка разлома Сан-Андреас исчислялась сотнями километров (более 400 км), а взаимные смещения смежных бортов разлома достигали 6 м. После землетрясения были выполнены повторные триангуляционные измерения на обширной территории, с большим запасом перекрывшей его эпицентральную зону. Результаты этой работы превзошли все ожидания: благодаря внушительным размерам деформированного землетрясением участка земной поверхности и ее значительным смещениям, даже при редком расположении пунктов триангуляции удалось достоверно определить действительные величины их смещений на различных удалениях от разлома. Именно эти геодезические данные и были основой предложенной Рейдом "Теории упругой отдачи". Следует отметить, что в этой теории Рейдом была допущена лишь одна принципиальная ошибка: некорректно имитируя процессы накопления упругих сейсмогенных деформаций в сейсмогенной зоне с помощью небольших пластинок желе, он пришел к ложному выводу о том, что сейсмогенные деформации должны быть деформациями однородного сдвига, тогда как в действительности они являются деформациями упругого изгиба. Представляет интерес аргументация отрицания Рейдом изгиба земной поверхности, установленного по геодезическим данным.

"Все явления находятся в тесном согласии с описанными выше лабораторными экспериментами. Главное различие состоит в том, что прямая линия, секущая разлом на земной поверхности не была разорвана в две прямые линии, как в лабораторном эксперименте, но в две искривленные линии. Мы приписываем это искривление тому факту, что силы, которые породили смещение поверхности Земли, были приложены под земной корой, тогда как в лабораторном эксперименте они были приложены к внешней границе желе" [33, р. 424].

Если учесть уровень знаний того времени о строении земной коры, о закономерностях изменений с глубиной реологических характеристик ее вещества, то в этом заблуждении ничего особенного нет. Однако, несомненно и то, что это заблуждение одного из первых ученых, догадавшегося об истинных причинах возникновения сильных землетрясений, не могло не оказать влияние на формирование последующих представлений о действительном характере поля напряжений, порождающего землетрясение.

Для обнаружения готовящихся очагов землетрясений, Рейд рекомендовал использовать метод повторных геодезических измерений.

Выше уже отмечалось, что в Калифорнии предпринимались попытки реализовать идеи Рейда на практике, но делалось это столь неумело, что привело к их дискредитации [15]. Может быть тогда и начался кризис в проблеме прогноза землетрясений – американцы разочаровались в опороченном методе. Очевидно, синдром неуспеха был настолько силен, что и теперь геодезические построения на сейсмогенных разломах США рассчитаны на что угодно, но только не на обнаружение мест готовящихся очагов землетрясений. Можно не сомневаться в том, что на сегодняшний день это единственная причина отсутствия точного прогноза мест подготовки сейсмических катастроф в Калифорнии.

Яркий пример сказанному – случившееся неожиданным разрушительное землетрясение в Сан-Франциско в 1989 г. и такое положение будет сохраняться до тех пор, пока американские ученые не изменят свое отношение к геодезическому методу.

Как уже отмечалось выше, в нашей стране использованию геодезического метода для прогноза землетрясений придавалось большое значение. Это нашло отражение уже в первой программе по прогнозу землетрясений, разработанной выдающимся

сейсмологом Б.Б. Голицыным [34]. Однако в силу разных причин планомерные, целенаправленные, научно обоснованные исследования по проблеме прогноза в нашей стране были начаты лишь в 1949 г. – после Ашхабадской сейсмической катастрофы 1948 г. Программа этих исследований была разработана Г.А. Гамбурцевым. Предложенные им "Перспективный план исследований по проблеме "Изыскание и развитие методов прогноза землетрясений" [30] и программа исследований столь продуманы и обоснованы, что все последующие аналогичные программы являются по существу их развитием, но, к сожалению, не совсем удачным.

Причину сейсмических явлений Г.А. Гамбурцев видел в тектонических движениях блоков земной коры и поэтому для целей прогноза землетрясений считал необходимым заниматься всесторонними исследованиями смещений и деформаций земной коры как геофизическими (деформометрия, наклонометрия), так и геодезическими методами. Однако развернуть такие исследования Гамбурцеву не пришлось – помешала внезапная смерть.

Существенный и противоречивый след в проблеме прогноза оставил Ч.Ф. Рихтер, который в своей, получившей широкое признание "Элементарной сейсмологии" сначала [15, стр. 181–182] сделал попытку опровергнуть основную идею Рейда: о концентрации сейсмогенных напряжений в узкой зоне вокруг разлома (в локальном объеме горных пород – очаге землетрясения). Он предложил гипотезу, согласно которой сейсмогенные деформации накапливаются вовсе не в локальных объемах, а в целых регионах, в которых какие-то неизвестные механизмы создают региональные поля однородного сдвига. Однако чуть позже (в той же самой книге) он отказался от этой гипотезы, так как написал следующее:

"Есть отдаленная надежда, что, быть может, без точного предсказания даты окажется возможным обнаруживать накопление деформаций в направлении возникновения сильного землетрясения в данном районе или, возможно, на данном разломе... Непосредственным способом изучения накопления деформации является повторная триангуляция и точная нивелировка..." [15, стр. 359]. Этот пример делает честь Ч.Ф. Рихтеру как ученому, не побоявшемуся отказаться от собственных заблуждений.

Убежденными и последовательными сторонниками использования геодезического метода были выдающиеся советские ученые Ю.А. Мещеряков и Ю.В. Ризниченко, а в настоящее время возможности этого метода весьма однозначно оценивает С.С. Григорян: "Таким образом, характерные смещения точек земной поверхности над очаговой зоной достигают величин, вполне доступных регистрации и измерению наземными и аэрокосмическими средствами, так что соответствующая геометрическая аномалия может четко регистрироваться современными средствами и использоваться для целей прогноза" [35, стр. 1085].

Итак, мы вправе заключить, что необходимость и перспективность использования геодезического метода в проблеме прогноза землетрясений понималась давно и многими. Логика подсказывала, что именно этот метод пригоден для отслеживания процесса накопления упругих сейсмогенных деформаций в готовящемся очаге землетрясения, т.е. для точного определения местонахождения этого очага. Но, как это ни странно, и действительный вид сейсмогенной деформации (деформационного предвестника) и размеры площади ее распространения оставались совершенно неясными и спорными.

Существовавшее еще совсем недавно состояние полной неопределенности в представлениях о прогнозном признаке сейсмогенных деформаций понял и прекрасно выразил, в приведенном в начале этой статьи высказывании, Ю.А. Мещеряков. Соображения Ю.А. Мещерякова, одного из энтузиастов и активнейшего пропагандиста использования геодезического метода для изучения современных тектонических движений земной коры и прогноза землетрясений, прозвучали в то время, когда в СССР развернулись широкомасштабные геодезические исследования на геодинамических полигонах. Толчком для начала этих исследований послужило Ташкентское землетрясение 1966 г. Академическими институтами и предприятиями ГУГК были созданы

десятки таких полигонов, но проведенные на них интенсивные геодезические исследования, нацеленные на поиски деформационных предвестников, оказались малоэффективными.

В свете вышеизложенного, это, конечно же, не является неожиданным. Незнание действительного вида и размеров прямого деформационного предвестника не позволило создать на прогнозных полигонах геодезические построения по размерам, форме и взаимному расположению в них пунктов, отвечающие своему основному назначению: обнаружению готовящихся очагов землетрясений. Стандартная же плотность пунктов геодезических сетей недостаточна для обнаружения и уверенного выделения сравнительно узких (5–10 км), сильно деформированных подготовкой землетрясений участков земной поверхности очаговых зон.

Можно не сомневаться, что уже не один раз повторными геодезическими измерениями были зафиксированы упругие смещения, обусловленные подготовкой сильных землетрясений, но так как при редкой сети пунктов это могло фиксироваться лишь отдельными пунктами, то такие результаты считали браком в работе и отбрасывали. Кроме того, незнание действительного вида деформационного предвестника не позволяло правильно интерпретировать полученные результаты [36].

По существу геодезические исследования того времени соответствовали пресловутым "поискам пятак под фонарем", так как в подражание другим методам геодезисты считали своей главной задачей лишь поиски различных разрозненных аномалий в смещениях и деформациях земной поверхности, которые тем или иным образом пытались связывать с прогнозом. Многолетние исследования показали ошибочность этого пути.

Итак, началом кризиса в проблеме прогноза землетрясений можно считать предпринятые в начале века американскими учеными неудачные попытки реализовать на практике идеи Рейда. Это привело к печальным последствиям: упустив возможность обнаруживать непосредственный деформационный предвестник методом решения прямой задачи, исследователи направили все усилия на реализацию проблемы прогноза методом решения обратных задач. Результат общеизвестен – проблема заведена в естественный тупик.

В свете изложенных выше представлений Г.А. Гамбурцева о происхождении сейсмичности можно было ожидать, что он мог бы вернуть проблему на правильный путь, но внезапная смерть прервала начатые им исследования по прогнозу в самом их начале и его идеи о "глубоком изучении всех деталей механизма быстрых и медленных движений блоков земной коры сейсмоактивных районов" не получили должного развития. Можно полагать, что это удалось бы сделать Ю.А. Мещерякову, который стал вплотную заниматься этой проблемой, но опять свою роковую роль сыграла преждевременная смерть.

Таким образом, с полным основанием можно говорить о том, что причины кризиса в проблеме прогноза землетрясений обусловлены в первую очередь незнанием действительных возможностей геодезического метода в этой проблеме.

Подтверждение этому, на первый взгляд кажущегося парадоксальным заключению, можно найти в книге двух наших известных сейсмологов.

"Теперь нам известно, что искать будущие землетрясения нужно там, где в недрах литосферы копится энергия деформации сдвига и где есть подходящие разломы для ее выделения... Но как узнать, где напряжения могут копиться, а где они тихо и незаметно рассасываются в результате спокойных, тихих процессов ползучести?... Итак, первая неудача: нет простого способа узнать, где в литосфере копится упругая энергия перекося. Нет общих явных признаков таких мест" [16, стр. 132–133].

Это высказывание яснее ясного говорит о том, насколько в те годы ученые, причастные к проблеме прогноза землетрясений, были далеки от понимания действительных возможностей геодезии в этой проблеме. Но совершенно очевидно и то, что в прогнозе местоположения готовящегося очага землетрясения А.В. Друмя и Н.В. Шибалин вслед за Мушкетовым, Рейдом, Гамбурцевым, Рихтером и Мещеряковым

вполне обоснованно пальму первенства отдали изучению закономерностей протекания механических, деформационных процессов.

В свете рассматриваемой ситуации чрезвычайно интересна книга И.П. Добровольского "Механика подготовки тектонического землетрясения". Удивляет то, что автор не проанализировал результаты повторных геодезических измерений в эпицентральных зонах сильных землетрясений, отказавшись тем самым от рассмотрения единственно достоверного экспериментального материала, который и мог бы ему помочь в выборе модели подготовки очага, адекватной природному процессу. Выбранная же им модель привела его к сверхпессимистическому выводу о полном отсутствии "типичного хода предвестника" [37, стр. 44], т.е. к выводу о невозможности прогноза.

С целью понять причины грустных оценок перспектив прогноза совершим небольшой экскурс в недалекое прошлое. Оценивая современное состояние проблемы прогноза землетрясений с позиций предложенных Т. Куном понятий "парадигма" и "нормальная наука" В.Н. Страхов сделал следующее заключение: "Трудами классиков сейсмологии и геологии в науке об оценке сейсмической опасности создана парадигма, для которой характерны эмпирическое обобщение, логика ретроспективного анализа и аналогии. Так вот, современная сейсмология уже несколько десятилетий развивается как нормальная наука в рамках данной парадигмы" [38, стр. 5].

Есть все основания считать, что 70–80-е годы нашего века были временем торжества идей такой "нормальной науки", т.е. торжеством "стратегии аномалий". Оно отмечено многими интересными и, как казалось, обнадеживающими открытиями, которые на поверку однако таковыми не оказывались, что, конечно же, не могло не порождать определенные сомнения в эффективности этой стратегии. Не предсказанные же разрушительные землетрясения конца 80-х и 90-х годов явились отрезвляющим фактором, наглядно продемонстрировавшим истинное положение дел в проблеме прогноза – эйфория сменилась унынием, брожением в умах и рождением различных спекуляций [38].

Без сомнения, к главным причинам кризиса следует отнести также завышенную оценку действительных возможностей сейсмологии в решении проблемы прогноза землетрясений.

Традиционно существует твердое убеждение в том, что главным и определяющим в проблеме прогноза землетрясений является сейсмологический метод. Логика здесь элементарно проста: коль скоро сейсмология является наукой о землетрясениях, то, следовательно, кому как не ей должен быть подвластен и прогноз этих явлений. Это, конечно, могло бы быть так, если бы в процессе подготовки очага землетрясения определяющими были не медленные процессы накопления горными породами упругой энергии, а быстрые (сейсмические) процессы сброса уже накопленной энергии. Однако долговременный медленный процесс созидания, подготовки очага сильного землетрясения и быстротекущий процесс его разрушения являются абсолютно разными, антагонистическими механическими процессами, углубленное исследование которых нельзя осуществить каким-либо одним методом.

Ложно-оптимистическое представление о действительных возможностях сейсмологического метода создает иллюзию простого "количественного" решения проблемы: стоит всего лишь создать побольше сейсмических станций. Однако эти представления не только не имеют теоретического обоснования, но, что самое главное, не подтверждаются и практикой. В Калифорнии уже давно создана очень густая сеть сейсмических станций, но для прогноза землетрясений это практически ничего не дало – очаг разрушительного Сан-Францисского землетрясения 1989 г., заранее обнаружен не был, а поэтому, как и прежде, землетрясение захватило большой город врасплох. Не были предсказаны в Калифорнии и более поздние сильные землетрясения, например, Лос-Анджелесское 1991 г.

Вот что о возможностях "количественного" решения проблемы прогноза в свое время было написано В.И. Кейлис-Бороком: "Долгое время работы по прогнозу землетрясений ориентировались в основном на расширение системы наблюдений. Калифор-

нийское землетрясение наглядно показало нам, насколько этого недостаточно. Оно произошло в середине самой мощной в мире наблюдательной сети, с тысячами датчиков, телеметрией, полной компьютеризацией" [Газета "Известия", № 307, 2 ноября 1989 г.].

Конечно, сейсмические станции нужны и чем их будет больше, тем более детально будет известно внутреннее строение Земли, в особенности ее верхних горизонтов, что очень важно не только в теоретическом, но и в практическом аспектах – поиск полезных ископаемых и др. Что касается проблемы прогноза, то, как указывалось выше, густая сеть сейсмических станций необходима для осуществления прогноза времени землетрясения в очаге, ранее выявленном геодезическим методом.

Приведенные соображения о завышенных оценках возможностей сейсмологии в проблеме прогноза землетрясений не являются оригинальными. В этом легко убедиться, обратившись к соответствующим соображениям трех выдающихся сейсмологов XX века. Г.А. Гамбурцев в начале пятидесятых годов написал следующее: "Таким образом, в основе современной методики сейсмического районирования лежит сейсмостатистика, дополняемая изучением глубинных условий возникновения землетрясений... В дальнейшем, по мере накопления наших знаний о природе землетрясений и об условиях их возникновения, роль сейсмостатистики должна уменьшаться и соответственно главное значение должны получить твердо обоснованные физические и геологические критерии сейсмичности" [14, стр. 431].

В перспективном плане исследований по проблеме прогноза Г.А. Гамбурцевым предусмотрены разделы: "Разработка методов изучения медленных движений блоков земной коры" и "Детальное изучение сейсмоактивных районов", где изучение закономерностей сейсмического режима предлагается вести на основе... "изучения медленных движений блоков земной коры" [30, стр. 308–309].

Достаточно категоричное мнение о возможностях сейсмологии и геодезии в проблеме прогноза землетрясений в конце пятидесятых годов высказал Ч.Ф. Рихтер: "В настоящее время возможности предсказания землетрясений, в обычном смысле слова, не существует, то есть никто не может с уверенностью сказать, что существенное землетрясение произойдет в данном месте в данное время... Есть отдаленная надежда, что, быть может, без точного предсказания даты окажется возможным обнаруживать накопление деформации в направлении возникновения сильного землетрясения в данном районе или, возможно, на данном разломе...

Непосредственным способом изучения накопления деформации является повторная триангуляция и точная нивелировка, как это проводится Береговой и геодезической службой Соединенных Штатов и различными организациями Японии" [15, стр. 359].

В 1969 г. была опубликована статья Ю.В. Ризниченко, в которой он показал, что в проблеме изучения внутреннего строения Земли сейсмологии принадлежит ведущая роль. Однако в этой статье имеется одно крайне существенное для рассматриваемой нами проблемы замечание: "Говоря о сейсмологии, автор не касается вопросов изучения и прогноза землетрясений" [39, стр. 335]. Это замечание Ю.В. Ризниченко дает нам право сделать заключение о том, что обоснованная им ведущая роль сейсмологии в изучении внутреннего строения Земли к прогнозу землетрясений не относится.

Автор этой статьи на протяжении нескольких лет имел счастливую возможность пользоваться консультациями Ю.В. Ризниченко и с полной ответственностью заявляет, что в проблеме прогноза землетрясений Юрий Владимирович, как и Юрий Александрович большие надежды возлагал на геодезию и активно поддерживал идеи о необходимости расширения соответствующих исследований.

Итак, имеются все основания для следующего заключения.

Подобно тому, как в изучении внутреннего строения Земли опорным методом является деформационный сейсмологический, так в проблеме прогноза сильных коровых землетрясений таковым является деформационный геодезический. Заключенные в геодезическом методе большие возможности в осуществлении прогноза обусловлены самой сутью тектоносейсмического процесса.

Случилось так, что в силу разных объективных и субъективных причин отмеченные возможности геодезического метода до сих пор остаются невостребованными. С точки зрения здравого смысла это совершенно противоестественная, антигуманная, а потому и нетерпимая ситуация. Я полагаю, что наш долг перед светлой памятью Юрия Александровича Мещерякова обязывает нас сделать все от нас зависящее для успешного решения проблемы прогноза землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mescherikov Yu.A.* Recent crust movements in seismic regions: geodetic and geomorphic data // *Tectonophysics*. 1968. № 10. P. 17–35.
2. Мещеряков Ю.А. О движениях земной коры – предвестниках землетрясений // *Земная кора сейсмоопасных зон*. М.: Наука, 1973. С. 94–103.
3. Певнев А.К. О прогнозе сильных коровых землетрясений // *Геодезия и картография*. 1987. № 4. С. 18–23.
4. Певнев А.К. Прогноз землетрясений – геодезические аспекты проблемы // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1988. № 12. С. 88–98.
5. Кейлис-Борок В.И. Динамика литосферы и прогноз землетрясений // *Природа*. 1989. № 12. С. 10–18.
6. Остропики П.А., Антоненко Э.М., Атрушкевич П.А. Опыт изучения современных движений земной коры в Приалмаатинском сейсмическом районе // *Современные движения земной коры*. Новосибирск: Наука, 1978. С. 74–81.
7. Кондратьев О.К. Разведочная геофизика с целью прогноза землетрясений // *Геофизика*. 1995. № 3. С. 19–25.
8. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 375 с.
9. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.
10. Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. 217 с.
11. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 415 с.
12. Сейсмический мониторинг земной коры. М.: Ин-т физики Земли АН СССР, 1986. 290 с.
13. Reid H.F. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906 // *Rep. of the State Investigation Commiss. Vol. 2. P. 1. Washington*. 1910. 56 p.
14. Гамбурцев Г.А. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 461 с.
15. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.
16. Друмя А.В., Шебакин Н.В. Землетрясение: где, когда, почему? Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
17. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
18. Захарова А.И., Москвина А.Г., Бансатарова И.П., Чепкунас Л.С. Некоторые особенности очаговых процессов Спитакского землетрясения // *Изв. АН СССР, Физика Земли*. 1991. № 11. С. 39–55.
19. Захарова А.И., Бармин М.П., Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С. Характеристики очагов и строение земной коры по наблюдениям Газлийских землетрясений в телесеismicической зоне // *Газлийские землетрясения 1976 и 1984 годов*. Ташкент. Фан, 1986. С. 15–22.
20. Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э. и др. Рачинское землетрясение 1991 г.: результаты полевых сейсмологических наблюдений // *Изв. АН СССР, Физика Земли*. 1993. № 3. С. 12–23.
21. Knopoff L. Energy release in earthquakes // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1958. V. 1. P. 44–52.
22. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 175 с.
23. Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Т. 1–2. М.: Мир, 1985. 730 с.
24. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
25. Эйби Дж.А. Землетрясения. М.: Недра, 1982. 264 с.
26. Kersting N. Zur Analyse rezenter Krustenbewegungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Schriftenreihe // *Universität der Bundeswehr München. Heft 42. Neubiberg*. 1992. 239 p.
27. Tsuboi C. Investigation on the deformation of the earth crust connected with the Tango earthquake of 1927 // *Bull. Earthq. Res. Inst.* 1932. № 10. P. 411–432.
28. Рикитакэ Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 400 с.
29. Бегларян А.Г. Разработка и совершенствование методов и приборов для автоматизации геодезических деформационных измерений инженерных сооружений и разломов земной коры. Ереван: Изд-во АН Армении, 1997. 104 с.
30. Гамбурцев Г.А. Перспективный план исследований по проблеме "Изыскание и развитие методов прогноза землетрясений" // *Развитие идей Г.А. Гамбурцева в геофизике*. М.: Наука, 1982. С. 304–311.
31. Гамбурцев А.Г., Певнев А.К. О перспективах геодезического и сейсмического мониторинга при прогнозе землетрясений // *Геофизика*. 1996. № 4. С. 35–41.

32. Мушкетов И.В. Вернинское землетрясение 28 мая (9 июня) 1887 г. // Тр. геолкома. № 1. 1890. Т. X. 154 с.
33. Reid H.F. The elastik-rebound theory of earthquakes // Bull. Departament Geology. Univ. Cflif. Publ. 1911. Vol. 6. № 19. P. 413–444.
34. Голицын Б.Б. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 2. 465 с.
35. Григорян С.С. О предсказании землетрясений // Докл. АН СССР. 1989. Т. 306. № 5. С. 1083–1087.
36. Пискулин В.А., Рийзман А.П. О деформациях земной поверхности в районе Газли // Геодезия и картография. 1985. № 9. С. 53–57.
37. Добровольский И.П. Механика подготовки механического землетрясения. М.: Ин-т физики Земли АН СССР, 1984. 189 с.
38. Страхов В.Н. К новой парадигме сейсмологии // Природа. 1989. № 12. С. 4–9.
39. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.

Мосгоргеотрест

Поступила в редакцию
20.12.99

A CONTRIBUTION OF J.A. MESCHERIKOV TO THE PROBLEM OF EARTHQUAKE PREDICTION (TO THE 80th ANNIVERSARY)

A.K. PEVNEV

S u m m a r y

Application of deformational (geodetic) method to the earthquake prediction gives good results. The development of strong earthquake source occurs with straight and the only valuable indication – flexible bend of rocks in the source. The upper boundary of the large source – Earth's surface – undergoes corresponding bend as well. The method of exact prognosis of the place and the maximum intensity of future earthquake by means of geodetic measurements is described. The way to real forecasting of the earthquake in the epicenters revealed by geodetic measurements is outlined.