

В.Н. Боков

**КАЧЕСТВО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ –
ОСНОВА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

V.N. Bokov

**QUALITY OF METEOROLOGICAL FORECASTS AS THE BASIS
FOR ACCURACY OF EARTHQUAKE PREDICTIONS**

Представлено новое направление метеорологии – воздействие атмосферных процессов на экзогенные процессы земной коры и прогноз землетрясений. Приведены оценки оправдываемости краткосрочных прогнозов землетрясений и показано, что кроме других факторов, качество среднесрочных метеорологических прогнозов определяет достоверность прогнозов землетрясений. На примере землетрясения в Пакистане (08.10.2005) рассмотрены ошибки метеорологического прогноза, приведшего к «запаздыванию» прогноза землетрясения на 20 ч 10 мин.

Подчеркнута необходимость оперативного сотрудничества метеорологической и сейсмологической служб в целях краткосрочного прогноза землетрясений.

A new direction in meteorology, effect of atmospheric processes on exogenic processes in the Earth's crust and earthquakes forecasting, is presented. Estimations of short-term forecast score for earthquakes are given; it is shown that, apart from other factors, quality of medium-range meteorological forecasts determines reliability of earthquakes forecasts. Taking the earthquake in Pakistan (08.10.2005) as an example, errors of the meteorological forecast are considered which had resulted in the lag of the earthquake forecast for 20 hrs 10 min.

The need for operative joint work of meteorological and seismological services is emphasized with a view to making short-term forecasts of earthquakes.

Метеорология, являясь разделом геофизики, связана со всеми природными средами около и на поверхности Земли. В последние годы у метеорологии появилось новое направление – исследование влияния атмосферных процессов на экзогенные процессы земной коры и прогноз землетрясений [Боков, 2000–2005; Сытинский, 1966, 1973, 1987, 1997, 2003]. Сильные землетрясения «готовятся» на обширном пространстве вокруг их эпицентра [Боков, 2003; Сытинский, 1987, 1997]. В процессе подготовки землетрясений на земную кору воздействуют дополнительные нагрузки атмосферных масс в миллионы тонн. Это обуславливает возникновение основных предвестников землетрясений (выделение литосферных газов, изменение пространственной интенсивности радона, изменения уровня грунтовых вод, акустические шумы и т.п.) [Уткин, 1998]. В сейсмически активных районах это происходит практически каждый день. Поскольку происхождение большинства предвестников в той или иной мере обусловлено атмосферой, то появление подобных предвестников сейсмологам следует связывать с атмосферными процессами.

О возможном влиянии атмосферного давления на сейсмичность Земли высказывались еще классики сейсмологии Б.Б. Голицын (1912 г.), В. Конрад (1932 г.), Б. Гутенберг (1935 г.). Однако в те годы каких-либо серьезных результатов в этом направлении получено не было. В период с 60-х по 90-е годы прошлого века наибольший вклад в изучение влияния атмосферной циркуляции на сейсмичность Земли внес А.Д. Сытинский [Сытинский, 1966, 1973, 1987, 1997, 2003]. Им установлены связи между тектоническими процессами, происходящими в земной коре, атмосферными процессами и солнечной активностью. Следует упомянуть и ряд других работ, посвященных изучению атмосферных и сейсмических связей. Так, например, в ряде работ [Гальперин, 1992, 1992а] показано, что для Центральной Азии большинству сильных землетрясений предшествуют метеорологические аномалии, большая часть землетрясений сопровождается сильными грозами, смерчами, шквальными ветрами и другими аномальными явлениями.

Попытки решить проблему краткосрочного прогноза землетрясений (1–2 сут.) уже давно предпринимаются учеными многих стран. Отметим, что обычно в общественном сознании прогноз землетрясений ассоциируется именно с краткосрочным прогнозом по аналогии с прогнозом погоды.

Традиционно принято считать, что землетрясения возникают в земной коре за счет тектонических напряжений, которые обусловлены дрейфом тектонических плит, а также физико-химическими процессами, приводящими к возникновению трещин. Однако такой подход, несмотря на десятилетия интенсивных исследований, не принес желаемого результата. Поэтому утверждения последних лет о том, что краткосрочные (1–2 сут.) прогнозы землетрясений возможны, вызывали большую долю скептицизма. Этот скептицизм зародился и «вырос» в среде сейсмологов как отраслевых, так и академических институтов. Основания для такого скептицизма были достаточно веские, поскольку в отличие от атмосферы процессы, происходящие внутри земной коры, при подготовке и возникновении землетрясений визуально не видны и не доступны для исследования. Поэтому для геологии процесс возникновения землетрясений будет еще долго оставаться мало изученным природным явлением.

На самом деле состояние проблемы краткосрочного прогнозирования землетрясений в науке не так пессимистично. Отход от традиционных взглядов и представлений на проблему возникновения землетрясений позволил, в общем, решить эту задачу. Предыдущие попытки прогнозирования землетрясения на основе метеорологической информации воплотились в реальность лишь за последние пять лет. Уже сегодня в России существует научно-прогностическая лаборатория, составляющая краткосрочные прогнозы землетрясений почти по всему Северному полушарию. Сейчас прогнозы ежедневно выставляются на сайт http://quake_vnb.rshu.ru. Успешность данных прогнозов составляет около 70 – 80 %. За три года существования сайта на нем было выставлено более 3000 слабых, умеренных и сильных землетрясений. Например, такие разрушительные землетрясения с многочисленными жертвами, как 12 ноября 1999 г. в Тур-

ции, 22 июня 2002 г. в Иране, 21 и 27 июня 2003 г. в Алжире, 25 сентября 2003 г. у берегов о. Хокайдо, 27 сентября 2003 г. в Алтайском крае; Марокко 24 февраля 2004 г.; Япония, 23 октября 2004 в префектуре Ниигата; Суматра 26 декабря 2004 г., 28 марта 2005 и множество других были предсказаны за 1–2 сут.

Наблюдения показывают, что основные предвестники землетрясений проявляются вдоль всего тектонического разлома, но определить место, где следует ожидать землетрясение, сейсмологи не могут. В то же время анализ синоптических условий четко указывает на возникновение перечисленных предвестников и позволяет определить место, время и силу землетрясения. Для этого выполняются расчеты термобарического инварианта V_t на основе прогностических метеорологических полей, выпускаемых как в Гидрометеорологическом центре России, так и в других мировых метеорологических центрах.

Методические разработки по расчету и анализу многомерных атмосферных процессов разработаны в ряде работ [Боков, 2001; Иванов, 2003]. Кратко рассмотрим алгоритм расчета V_t как векторного процесса изменчивости атмосферных преобразований. Поле барического градиента $\vec{V}(\vec{r}, t)$, зависящее от пространства $\vec{r}(x, y, z)$ и времени t , многомерно, а векторная случайная величина \vec{V} многомерна, так как в системе географических координат она описывается двумя проекциями – V_x на параллель и V_y на меридиан. Одноточечные моменты $\overline{m_{\vec{V}}}(\cdot)$ и $\mathbf{D}_{\vec{V}}(\cdot)$ зависят от \vec{r} и t , а двухточечные $\mathbf{K}_{\vec{V}}(\cdot, \cdot)$ – от \vec{r}, t и \vec{r}, τ ; $\overline{m_{\vec{V}}}(\cdot)$ – векторная величина, а $\mathbf{D}_{\vec{V}}(\cdot)$ – диадный тензор.

Для количественной оценки неоднородности скалярного (температуры) ζ и векторного (градиент атмосферного давления) \vec{V} полей используем их градиенты – пространственные производные:

$$\vec{\nabla}\zeta \equiv \frac{\partial\zeta}{\partial\vec{r}}, \quad (1)$$

$$\mathbf{Grad}\vec{V} \equiv \frac{\partial\vec{V}}{\partial\vec{r}}. \quad (2)$$

Операции (1), (2) дают возможность при каждом \vec{r} и t поставить в соответствие скалярному полю ζ векторное поле $\vec{\nabla}\zeta$ с компонентами

$$\left(\begin{array}{l} \zeta'_x = \frac{\partial\zeta}{\partial x} \\ \zeta'_y = \frac{\partial\zeta}{\partial y} \end{array} \right), \quad (3)$$

а векторному полю \vec{V} – тензорное поле $\mathbf{Grad}\vec{V} \equiv \frac{\partial\vec{V}}{\partial\vec{r}}$ с компонентами

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial V_x}{\partial x} & \frac{\partial V_y}{\partial x} \\ \frac{\partial V_x}{\partial y} & \frac{\partial V_y}{\partial y} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Средние значения аномалий $\bar{m}_{\bar{V}\zeta}$ и $M_{\text{Grad}\bar{V}}$ можно вычислить по полям ежесуточных величин $m_{\zeta}(\bullet)$ и $\bar{m}_{\bar{V}}(\bullet)$. Линейность операции осреднения постулирует равенство компонентов $(m_{\zeta_x}, m_{\zeta_y})$ вектора $\bar{m}_{\bar{V}\zeta}$ средним значениям проекций (3). Симметричная часть тензора (4) имеет линейный инвариант

$$I_1 = \text{div}\bar{V} \quad (5)$$

и квадратичный инвариант

$$I_2 = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right)^2, \quad (6)$$

а кососимметричная часть тензора (4) – инвариант

$$\Omega = \frac{1}{2} \text{rot}_z \bar{V}. \quad (7)$$

Симметричному тензору с инвариантами (5), (6) может быть поставлена в соответствие кривая второго порядка

$$\lambda^2 - I_1 \lambda + I_2 = 0 \quad (8)$$

с главными полуосями

$$\lambda_{1,2} = 0,5 \left(I_1 - \sqrt{I_1^2 - 4I_2} \right), \quad (9)$$

развернутыми на угол

$$\alpha = 0,5 \arctg \frac{(\partial V_y / \partial x + \partial V_x / \partial y)}{(\partial V / \partial x - \partial V_y / \partial y)} \quad (10)$$

относительно исходной системы координат. Для поля средних $\bar{m}_{\bar{V}}(\bullet)$ векторов \bar{V} барического градиента инварианты (5)–(10) позволяют дать характеристику средней неоднородности векторного поля.

Изменчивость термобарического инварианта рассчитывается как

$$V_t = 0,5 \left(I_1 - \sqrt{I_1^2 - 4I_2} \right)^2 + 0,5 \left(I_1 + \sqrt{I_1^2 - 4I_2} \right)^2. \quad (11)$$

На основе вышеизложенных закономерностей и ряда приемов был разработан так называемый сейсмосиноптический метод краткосрочного прогнозирования землетрясений [Боков, 2002, 2003а, 2004]. При составлении прогнозов

также учитываются законы деформации, упругости, неравномерного движения по окружности, сохранения момента количества движения Земли и ряд других физических законов. Не останавливаясь на механизмах возникновения землетрясений, рассмотрим очень важный вопрос – влияние точности метеорологических прогностических полей на точность прогнозов землетрясений.

С мая 2001 по май 2003 г. нами было спрогнозировано 1597 слабых, умеренных и сильных землетрясений, из которых оправдались 1118 (не оправдались в основном слабые). Статистические оценки оправдаваемости прогнозов за указанный период приведены на рисунках 1 и 2.

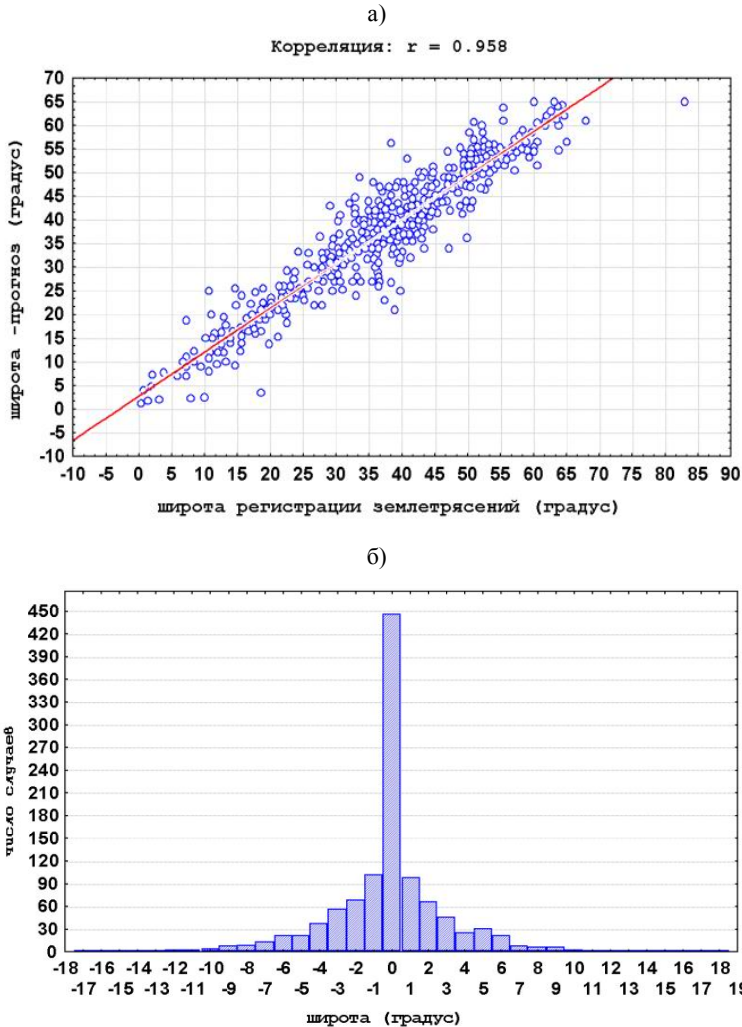


Рис. 1. Корреляционный график прогностических и зарегистрированных значений широт землетрясений (а); гистограмма оценок прогностических значений эпицентра землетрясений (б). $n = 1118$.

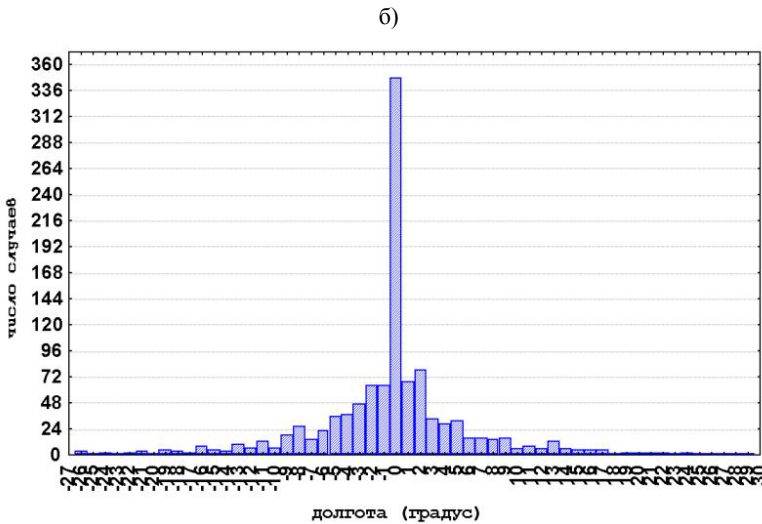
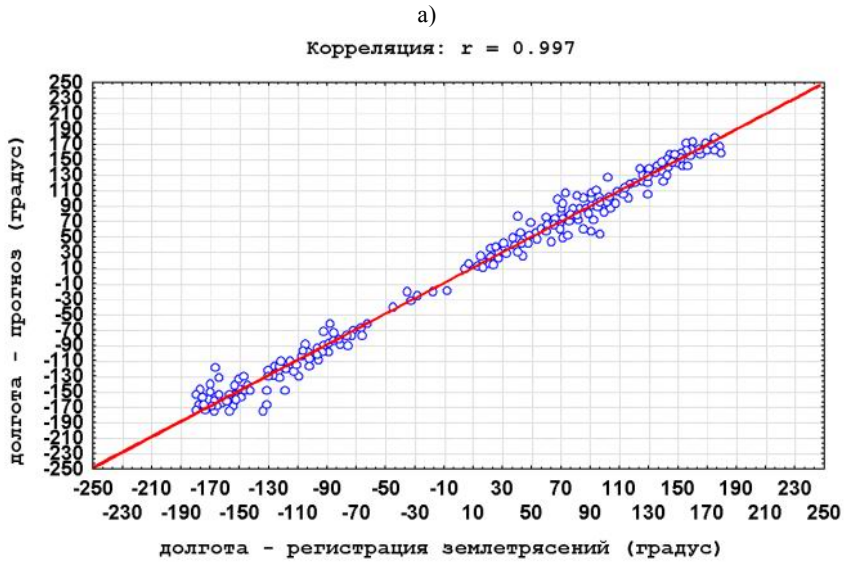


Рис. 2. Корреляционный график прогностических и зарегистрированных значений долгот землетрясений (а); гистограмма оценок прогностических значений эпицентра землетрясений (б). $n = 1118$.

Статистические оценки качества прогнозов представлены по трем критериям:

- по времени землетрясения;
- по широте (пространственная оценка);
- по долготе (пространственная оценка).

Время предполагаемого сейсмического события является важнейшим элементом краткосрочного прогноза. Подчеркнем то, что в нашем распоряжении

имелись метеорологические данные с 24-часовым интервалом, поэтому время наступления предполагаемого землетрясения могло варьировать в пределах ± 13 ч от расчетного срока. Из 1118 прогнозов 978 случаев оправдались в тот день, на который они прогнозировались; 87 землетрясений произошло с опозданием или опережением от 1 до 12 ч, в 55 случаях отклонение составило от 12 до 23 ч. Точность определения времени предполагаемого землетрясения зависит от дискретности прогностических данных: чем меньше дискретность, тем точнее определяется время удара стихии.

Рассмотрим пространственные оценки прогнозов по широте и долготе. Существенным элементом прогноза является точное определение места землетрясений. В качестве оценки, удовлетворяющей прогноз места эпицентра, на современном этапе развития науки принят пространственный интервал в 1 градус. Сопоставление прогностических и зарегистрированных эпицентров землетрясений по широте показало их высокую связь с коэффициентом корреляции $r = 0,96$ (рис. 1а), что уже свидетельствует о достоверности прогнозов. Оценка качества прогноза эпицентра землетрясений по широте (рис. 1б), заключающаяся в сравнении значений прогнозов и наблюдений, показала, что в 449 случаях разница между ними составила менее 1 градуса. Примерно такое же число случаев (несколько больше) приходится на интервал с разницей от 1 до 5 градусов. На этом остановимся несколько подробнее.

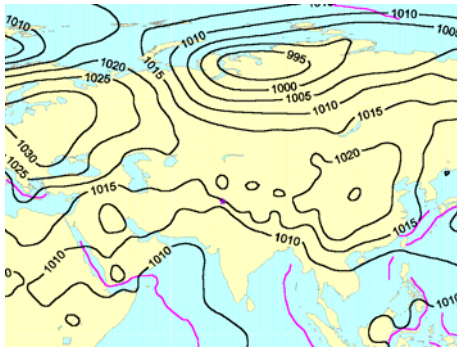
Анализ подобных случаев показал, что различия прогностических и зарегистрированных эпицентров землетрясений от 110 до 550 км обусловлены ошибками метеорологической информации. Очень часто прогностические центры атмосферных вихрей отличаются от фактического положения до 500–600 км. Особенно это характерно для горных территорий и акваторий морей и океанов. В последние годы разработчики прогностических атмосферных моделей большое внимание уделяют увеличению продолжительности срока прогноза, доводя его до 10 сут. Однако, судя по многолетним результатам, на более короткие сроки (3–4 сут) внимания уделяется меньше, очевидно, считается, что этот прогностический интервал полностью разработан. Но ежедневная практика работы в данном прогностическом интервале показала на неудовлетворительное качество метеорологических прогнозов. Для прогноза землетрясений качество метеорологических прогнозов должно быть выше. Если мировому сообществу необходимы прогнозы землетрясений, то необходимо увеличить число метеорологических станций и постов в сейсмически опасных районах, а также увеличить финансирование научных разработок по улучшению качества прогнозов взамен милитаризации. Одним из множества решений по улучшению качества метеорологических прогнозов на 3–4 сут может быть модуль внешнего воздействия на атмосферу. В настоящее время опубликованы работы (например, [Сытинский, 2003]), которые позволяют начать подобную разработку. Справедливости ради отметим, что в данном интервале ошибок (1 – 5 градусов) виновата не только прогностическая метеорологическая информация, но и полное отсутст-

вие оперативной сейсмологической информации при составлении прогнозов. Поскольку значения V_t на прогностических картах отражаются в виде изолиний, то для точного определения места эпицентра землетрясения необходима оперативная сейсмологическая информация. Пока мы используем другие подходы к определению места предполагаемого эпицентра, но они существенно зависят от качества метеорологических прогнозов.

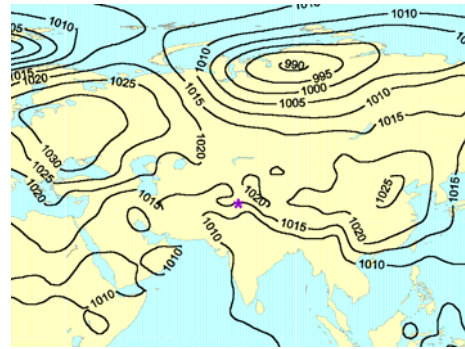
Вернувшись к рис. 1б, отметим существование интервала с разницей от 6 до 11 градусов, что обусловлено только отсутствием сейсмологических оперативных данных. Подобные оценки качества прогнозов получены по долготам. Соответственно коэффициент корреляции прогнозов с наблюдениями землетрясений по долготе составляет $r = 0,99$ (рис. 2а). Оценка качества прогнозов эпицентра землетрясений по долготе показала, что в 348 случаях разница между фактом и прогнозом составила менее 1 градуса (рис. 2б).

В качестве примера к вышесказанному рассмотрим землетрясение 8 октября 2005 г. в Пакистане, приведшего к большим человеческим жертвам. Предварительно составленный, но еще пока не полный, каталог синоптических ситуаций, обуславливающих землетрясения в данном районе [Боков, 2003], помог нам за 3 сут «увидеть» данное землетрясение. На рис.3 приведена карта фактического приземного атмосферного давления на 7 октября 2005 г., являющаяся одной из типичных атмосферных ситуаций, инициирующих землетрясения в данном районе.

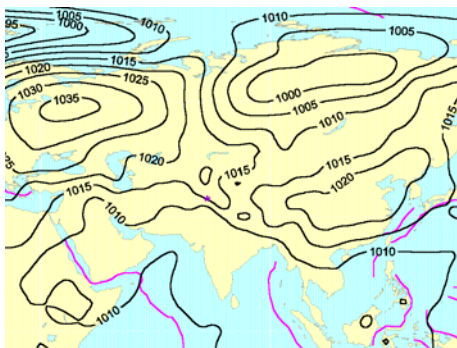
Быстрые атмосферные преобразования предшествуют возникновению землетрясений [Боков, 2000, 2003; Сытинский, 1993, 1997]. Для рассматриваемого района типичным является быстрое образование небольшого антициклона на северо-востоке от эпицентра землетрясения и дальнейшее увеличение области повышенного давления. Это хорошо видно на фактических картах за 7 и 8 октября 2005 г. На прогностических картах на 7, 8 октября 2005 г. наблюдается иная изменчивость атмосферного давления, чем фактическая. Соответственно расчетные значения термодинамического инварианта V_t также отличаются от фактических (рис. 4). Место эпицентра землетрясения (отмечено «звездочкой») четко определяется по «нулевому» значению термодинамического инварианта [Вокон, 2005]. Сопоставление результатов расчетов V_t по прогностическому и фактическому полям показывает, что значения V_t точно указывают на эпицентр землетрясения по фактическим данным. Поскольку прогностические метеорологические поля оказались некачественными (рис. 3), то вместо прогноза землетрясения на 8 октября в Пакистане был дан прогноз умеренного землетрясения с эпицентром на территории Ирана. Землетрясение в Пакистане, близкое к месту эпицентра, прогнозировалось на 9 октября, что четко видно на карте прогностических расчетов V_t (рис. 4). Фактическая изменчивость атмосферных процессов оказалась быстрее прогностических, что и привело к «опозданию» времени прогноза землетрясения на 20 ч 10 мин.



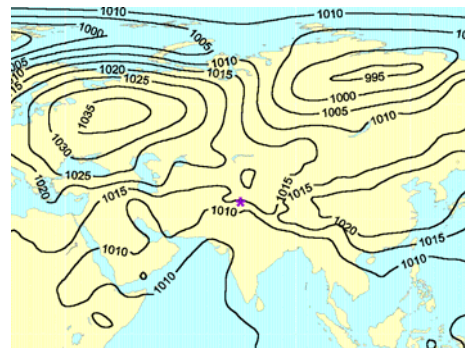
07.10.2005 Прогностическое поле



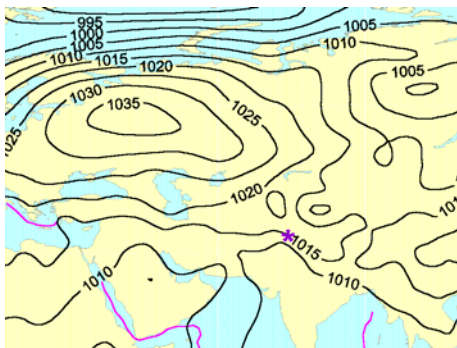
07.10.2005 Фактическое поле



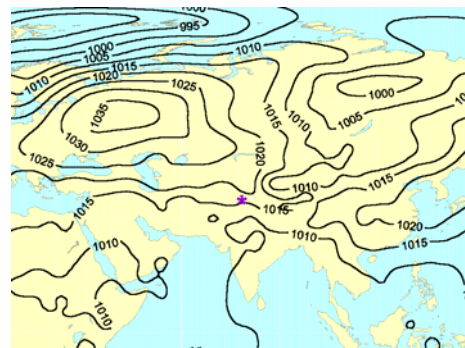
08.10.2005 Прогностическое поле



08.10.2005 Фактическое поле

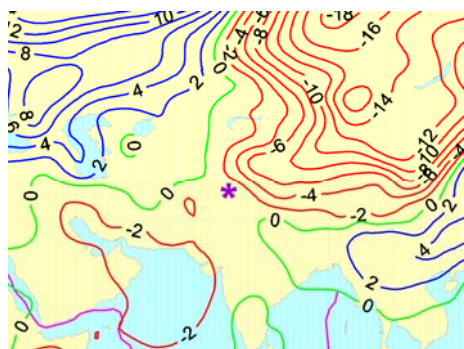


09.10.2005 Прогностическое поле

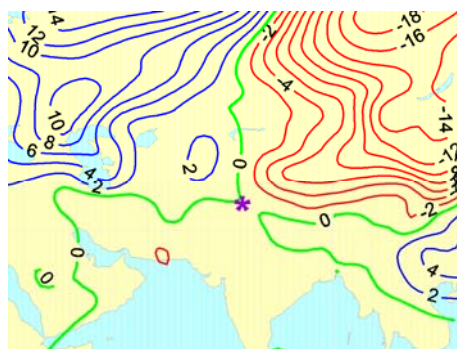


09.10.2005 Фактическое поле

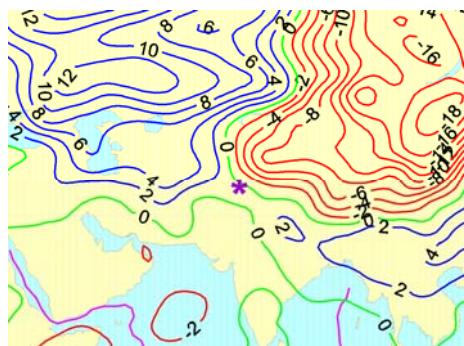
Рис. 3. Сопоставление прогностических и фактических полей давления, используемых при составлении краткосрочного прогноза землетрясения в Пакистане. (Время по Гринвичу 3 ч 50 мин 8 октября 2005 г.) Звездочкой указан эпицентр землетрясения.



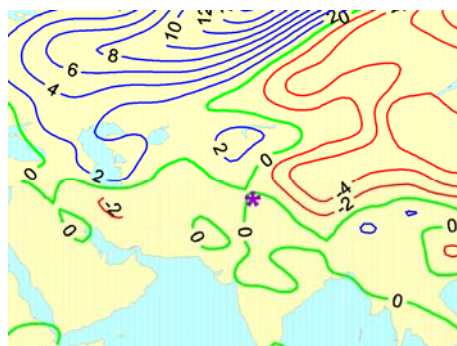
08.10.2005 Прогноз



08.10.2005 Факт



09.10.2005 Прогноз



09.10.2005 Факт

Рис. 4. Сопоставление прогностических и фактических значений термобарического инварианта V_t , используемого при составлении краткосрочного прогноза землетрясения в Пакистане. (Время по Гринвичу 3 ч 50 мин 8 октября 2005 г.) Звездочкой указан эпицентр землетрясения.

Приведенные результаты убедительно показывают, что в случае улучшения метеорологической прогностической информации соответственно увеличится и достоверность прогнозов землетрясений. Подчеркнем, что достичь еще более высокой достоверности и точности краткосрочных прогнозов землетрясений (90–95 %) можно лишь при совместном участии специалистов различных направлений в геофизике – метеорологов и сейсмологов.

Литература

1. Боков В.Н. О перспективах использования солнечно-атмосферных связей в прогнозировании сейсмичности Земли // Изв. РГО РАН, 2000, т. 132, вып.4, с. 38–46.
2. Боков В.Н., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А. Пространственно-временная изменчивость поля ветра в умеренных широтах Северного полушария. // Изв. АН РАН. Физика атмосферы и океана, 2001, т. 37, № 2, с 170–181
3. Боков В.Н., Сытинский А.Д. Оперативный краткосрочный прогноз землетрясений на основе сейсмо-синоптического метода (результаты годового испытания). // Научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их источников», МЧС, 26–27 июня, Доклады и выступления. – М.: Центр «Антистихия», 2002, с. 34–39.

4. *Боков В.Н.* Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений. // Изв. РГО РАН, 2003, т. 135, вып. 6, с. 54–65.
5. *Боков В.Н.* Оперативный краткосрочный прогноз землетрясений. // Жизнь и безопасность, 2003 а, № 3–4, с. 147–151.
6. *Боков В.Н.* О стратегии в краткосрочном прогнозировании землетрясений, горных ударов и техногенных аварий. // Жизнь и безопасность, 2004, № 2–3а, с. 158–161.
7. *Гальперин А.А., Панова Е.Н., Чичасов Г.Н.* Метеорологические факторы в диагнозе крупных землетрясений // Труды Казахского регионального НИГМИ, 1992, № 3.
8. *Гальперин А.А., Чичасов Г.Н.* О метеорологических и геофизических условиях крупных землетрясений // Труды Казахского регионального НИГМИ, 1992а, № 3.
9. *Голицын Б.Б.* Лекции по сейсмометрии. – СПб.: Типог. императорской АН, 1912, с. 486.
10. *Гутенберг Б.* Основы сейсмологии. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. –146 с.
11. *Иванов Н.Е., Клеванцов Ю.П., Макарова А.В., Рожков В.А.* Пространственно-временная изменчивость гидрометеорологических полей и их экстремумы. // Изв. РГО РАН, 2003, т. 135, вып. 4, с. 13–35.
12. *Сытинский А.Д.* О механизме влияния солнечной активности на атмосферу и литосферу Земли. // Геомагнетизм и аэрономия, 1966, т. 6, № 4, с. 726–732.
13. *Сытинский А.Д.* О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли. // ДАН СССР, 1973, т. 209, № 5, с. 1078–1081.
14. *Сытинский А.Д.* Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 100 с.
15. *Сытинский А.Д.* О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений. // Геомагнетизм и аэрономия, 1997, т. 37, № 2, с. 132.
16. *Сытинский А.Д., Боков В.Н., Оборин А.Д.* Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и в межпланетной среде. // Геомагнетизм и аэрономия, 2003, т. 43, № 1, с. 136–142.
17. *Уткин В.И., Юрков А.К.* Динамика выделения радона из массива горных пород как краткосрочный предвестник землетрясения // Докл. РАН, 1998, т. 358, № 5, с. 675–680.
18. *Vokov V.N., Tronin A.A.* Atmospheric conditions and earthquakes. Kobe earthquake case. EInternational Workshop on Seismo Electromagnetics IWSE-2005, Tokyo, 2005, p. 296–299.
19. *Conrad V.* Die Zeitliche Folge der Erdbeben und bebenauslosende Ursachen. – Handbuch der Geophysik, Berlin, 1932, Bd. 4, S. 1007–1185.