В.Н. Боков, В.Н. Воробьев

ВАРИАЦИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗМЕНЧИВОСТИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

V.N. Bokov, V.N. Vorobiev

VARIATIONS IN SURFACE TEMPERATURE OF THE EARTH'S CRUST UNDER THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC PRESSURE CHANGES

В статье представлены результаты анализа появления тепловых аномалий у поверхности земной коры. Эти данные пытаются применять в качестве геофизических предвестников землетрясений. Обнаружено, что усиление интенсивности тепловых аномалий зависит от изменения атмосферных процессов и барических нагрузок на земную поверхность. Для успешного краткосрочного прогноза сейсмических событий необходимо совместное использование измерений тепловых аномалий и мониторинга атмосферных процессов.

Ключевые слова: тепловые аномалии, геофизический предвестник землетрясений, изменения атмосферной циркуляции, краткосрочный прогноз землетрясений.

The article presents the results of the analysis of occurrence of thermal anomalies at the surface of the crust, which are tried to be applied as geophysical precursors of earthquakes. It is found that the intensity of thermal anomalies depends on the changes of the atmospheric processes and on the pressure loads on the ground surface. It is necessary to use both, the measurements of thermal anomalies and monitoring of atmospheric processes for the successful short-term forecasting of seismic events.

Key words: thermal anomaly, geophysical precursor of earthquakes, changes in atmospheric circulation, short-term earthquake prediction.

Изучение связи тепловых аномалий поверхностной температуры земной коры с землетрясениями исторически началось со Средней Азии [7, 9, 10]. Планомерные исследования начались в 1986 г. Интенсивность тепловых аномалий достигает 3–4 °С выше окружающего фона. Воздух над аномалией также имеет повышенную температуру, что подтверждается данными метеорологических наблюдений и спутниковых наблюдений за вертикальным разрезом атмосферы [7, 9, 10, 12]. Подобные геофизические измерения пытаются применить в качестве предвестника сейсмических событий. Анализ сведений о температуре почвы и нижних слоев атмосферы, собранных метеорологическими спутниками в регионах, где вскоре происходили землетрясения, показал, что тепловая аномалия охватывает круг радиусом примерно 100 км от эпицентра землетрясения.

При этом небо в зоне будущего землетрясения должно быть безоблачным, а на земле не должно быть высокой растительности, например кустарника или леса. В регионах, где подобные условия отсутствуют, землетрясения всегда будут неожиданными.

Анализ появления тепловых аномалий перед возникновением сейсмических явлений показал следующее: аномалии реагируют на коровые землетрясения (в сейсмологии коровыми землетрясениями называют землетрясения, происходящие в земной коре) с магнитудой $M > 4{,}3$ в пределах Туранской плиты и Тянь-Шаня (рис. 1). При этом максимальная дальность реакции тепловой аномалии S составила 1200 км, для большинства же землетрясений эта величина не превосходила 800 км. Предпринималась попытка связать эпицентральное расстояние, максимальную площадь аномалии и магнитуду, в результате была получена зависимость вида [9, 10]:

$$\log\left(R \cdot A1\right) = 0{,}21 \cdot M + 6{,}1, \tag{1}$$

где $A1$ — максимальная площадь тепловой аномалии S; R — расстояние от эпицентра до аномалии S, км; M — магнитуда землетрясения. Подобные зависимости обычно увязывают с выражением для теоретической оценки радиуса зоны деформационных предвестников [8]:

$$\log\left(R \cdot \epsilon^{1/3}\right) = 0{,}5M - 3{,}06 \quad \text{для } M < 5, \tag{2}$$

$$\log\left(R \cdot \epsilon^{1/3}\right) = 0{,}43M - 2{,}73 \quad \text{для } M \geq 5, \tag{3}$$

где ϵ — деформация. Полученная зависимость (1) напоминает теоретические (2) и (3), при этом площадь аномалии следует увязывать с величиной деформации.

В перечисленных работах за крайнюю величину деформации 10^{-8} принималась величина приливной деформации. При этом было получено удовлетворительное соответствие тепловых аномалий с сильными землетрясениями. Для более слабых землетрясений проявляется явное несоответствие: тепловые аномалии прослеживаются от событий, удалённых до 1200 км. В работах [9, 10] выдвигалось несколько предположений, объясняющих данное несоответствие. Одна из гипотез: необходимо предположить сильную анизотропию деформации в сейсмическом процессе, то есть деформации изменяются в пространстве не в соответствии с R^3, а в зависимости от направления. Это подтверждается реакцией аномалии на землетрясения в пределах Туранской плиты и Тянь-Шаня [10]. Направление деформации земной коры зависит от пространственной изменчивости атмосферной циркуляции, которая усиливает или ослабляет напряжение на земную кору [2, 3–5, 6]. Барические деформации сжатия или растяжения в зависимости от реологии и расположения разломов приводят к возникновению тепловых аномалий и землетрясений в местах разломов и зонах крупных тектонических нарушений.

В работах [9, 10] показано, что положительные тепловые аномалии в Среднеазиатском регионе образуются над крупными разрывными нарушениями, такими как Предкопетдагский, Каратауский (Таласо-Ферганским), Джалаир-Найманский и другие разломы. В ряде других регионов появления тепловых аномалий не происходит

(рис. 1) в силу региональных реологических свойств земной коры. Подчеркнем наличие квазицикличности в развитии тепловых аномалий с периодом 7–8 суток [9, 10, 12], что соответствует естественному синоптическому периоду. Отметим соответствие пространственных размеров тепловых аномалий, которые зависят от магнитуды сейсмического события и могут достигать до 100 000 км^2, что сопоставимо с типичными размерами полей барических нагрузок атмосферных вихрей. Приведенные сведения о тепловых аномалиях и ряд соответствий с атмосферными процессами позволяют выдвинуть предположение о зависимости аномалий от изменчивости атмосферной циркуляции. При этом следует учитывать, что эндогенные процессы уже «подготовили» условия для повышения температурного фона в земной коре.

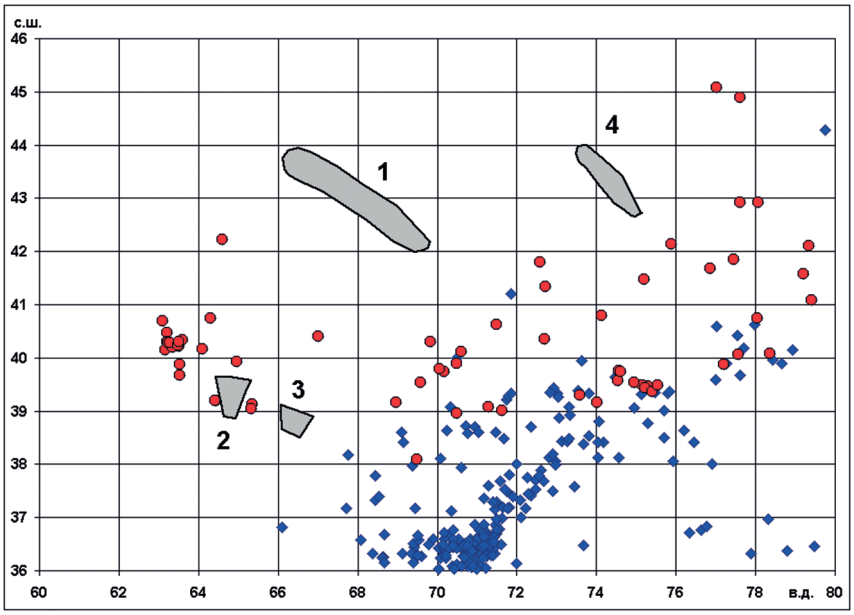


Рис. 1. Схема реакции тепловых аномалий на землетрясения Средней Азии: кружки — тепловые аномалии реагируют на эти землетрясения; прямоугольники — нет реакции тепловых аномалий; цифрами обозначены номера тепловых аномалий [12]

Попытаемся выявить возможность образования такого предвестника землетрясений, как тепловая аномалия с последующим возникновением землетрясений в результате атмосферных преобразований. Часто наблюдаемое в природе быстрое возрастание дополнительной массы воздуха над определенным участком земной коры приводит к увеличению давления на кору, что порождает силы, противоположные силам упругости в коре, как с вертикальными, так и горизонтальными составляющими [3]. Увеличение сил напряженности и последующее их снятие приводят к усилению истечения литосферных газов в приземную атмосферу с повышенной температурой, а также увеличению концентрации радона и т.д.

Если рассматривать верхний слой земной коры как пористую одномерную среду с рыхлыми отложениями, наполненную теплым подпочвенным газом, «доставленным» из разломов, то скорость потока подпочвенного газа подчиняется закону Дарси [11]:

$$V = \frac{K}{\mu} \times \frac{\partial P}{\partial z}, \tag{4}$$

где K — коэффициент проницаемости рыхлых отложений; μ — динамическая вязкость газа; $\partial P/\partial z$ — градиент давления в подпочвенном газе, при условии $\partial P \leq P_0$ — атмосферное давление в приземной воздухе.

Выражение (4) означает, что на границе пористой среды и атмосферы происходит взаимодействие атмосферного воздуха с подпочвенным газом, который содержит тепло. При увеличении атмосферного давления воздух входит в поры и «прижимает» газ. При уменьшении давления воздух и часть подпочвенного газа с повышенной температурой выходят из пор и поступают в приземный слой атмосферы. Этот процесс отчетливо виден на нижеследующих случаях.

Рассмотрим появление термических аномалий в период серии сейсмических событий в районе Казахстана в августе 1985 г. В таблице представлена временная изменчивость температурных аномалий в указанном районе. Обозначение аномалии *S*1 отмечает аномалию в 1 °С и далее в соответствии: *S*2 — аномалия в 2 °С ... и *S*4 — аномалия в 4 °С. Из таблицы следует, что температурные аномалии могут возникать непосредственно перед землетрясением, а также после сейсмического события. Наблюдаются и случаи отсутствия температурных аномалий перед землетрясением. Подобная временная изменчивость согласуется с приведенными выше выражениями и теоретическими выводами.

Временная изменчивость температурных аномалий в районе Казахстана в августе 1985 г.

Дата	S1	S2	S3	S4	Дата	Время	Широта	Долгота	Глубина	Магнитуда
13.08.85	0	0	0	0						
14.08.85	0	0	0	0	14.08.85	2:29:15.14	39.7	63.53	33	4.2
15.08.85	10	0	0	1						
16.08.85	15	0	0	1						
17.08.85	10	0	0	2	17.08.85	2:49:54.57	41.6	79.21	33	4.7
18.08.85	3	0	0	1						
19.08.85	0	0	0	0						
20.08.85	0	0	0	0						
21.08.85	6	0	1	1						
22.08.85	10	0	0	3						
23.08.85	14	0	0	2	23.08.85	12:41:56.16	39.4	75.22	6	7.5
24.08.85	16	0	0	2						
25.08.85	8	0	0	2						
26.08.85	0	0	0	0						

На рис. 2 представлена последовательность барических карт атмосферного давления в соответствии с временным ходом событий, представленных в таблице. На картах звездочкой отмечены эпицентры землетрясений за 14, 17 и 23 августа 1985 г. Последовательность взаимодействия между атмосферным давлением и земной коры имеет небольшую фазу сдвига (около нескольких часов), поскольку использовались данные атмосферного давления один срок (12 ч) в сутки.

Анализ временной изменчивости атмосферного давления в точке эпицентра и на окружающей территории 13 и 14 августа (рис. 2) показывает область повышенного атмосферного давления на северо-западе от эпицентра землетрясения и область пониженного атмосферного давления на юго-востоке. При этом выделения тепловых аномалий не наблюдается, поскольку процесс поступления литосферных газов с глубины и формирования очагов с повышенной температурой у поверхности земной коры еще не закончен. Тепловые аномалии появляются после землетрясения 15–17 августа. В процессе сейсмического толчка разломная зона «открылась», и к поверхности земной коры стали поступать литосферные газы с повышенной температурой. В этот интервал времени в атмосфере произошли изменения, которые способствовали поступлению литосферных газов с повышенной температурой между геоблоками. Область повышенного атмосферного давления также образовалась и на юго-востоке от эпицентра землетрясения вместо области пониженного атмосферного давления. В результате атмосферных преобразований тепловые аномалии образовались на границе областей повышенного и пониженного атмосферного давления. После землетрясения 18 августа наблюдалось уменьшение интенсивности тепловых аномалий, и в последующие два дня (19–20 августа) тепловые аномалии исчезли. Отсутствие тепловых аномалий обусловлено двумя процессами: уменьшением количества литосферных газов с повышенной температурой на рассматриваемой территории, а также динамикой смещения границы областей повышенного и пониженного атмосферного давления из эпицентра землетрясения.

За два дня перед третьим, сильным землетрясением, снова произошло увеличение площади и интенсивности тепловых аномалий на границе областей повышенного и пониженного атмосферного давления в результате накопления литосферных газов с повышенной температурой и атмосферных преобразований. После землетрясения 23 августа наблюдается сохранение интенсивности тепловых аномалий в течение последующих двух дней (24–25 августа). 26 августа тепловые аномалии отсутствуют.

Достаточно четко появление предвестников — тепловых аномалий и затем землетрясений — согласуется с расчетом пространственных значений барических нагрузок $\Delta P(r, t)$, где r — пространство, t — время, в момент землетрясения. Так, на рис. 3 отражено пространственное распределение барических нагрузок для всех трех случаев землетрясений, представленных в таблице. Как уже упоминалось выше, существенное значение при возникновении тепловых аномалий и землетрясений имеют: направление деформации земной коры, ее реология и расположение разломов. Это хорошо видно из рисунка, поскольку все три землетрясения произошли в разных точках пространства. Так, например, для небольших землетрясений 14 и 17 августа барические нагрузки характеризуют место эпицентра в соответствии с нулевой изолинией деформации и расположением области положительных значений

на северо-востоке от очага землетрясения. Благодаря региональным реологическим свойствам земной коры сильное землетрясение 23 августа произошло у поверхности земли. Поля барических нагрузок, так же, как и в первых двух случаях, характеризует место эпицентра в соответствии с нулевой изолинией деформации, но расположение области положительных нагрузок уже находится на северо-западе от очага землетрясения. Подчеркнем, что деформационные процессы в земной коре происходят в соответствии с региональными реологическими свойствами коры и в соответствии с направлениями барического градиента [1, 3].

После землетрясения 23 августа наблюдалось сохранение интенсивности тепловых аномалий в течение последующих двух дней (24–25 августа), что связано с истечением литосферных газов с повышенной температурой из разломной зоны. 26 августа тепловые аномалии уже не наблюдались, что возможно связано с закрытием разлома.

При этом четко прослеживается отклик аномалий на изменение направлений деформаций, обусловленных градиентом роста атмосферного давления. Поскольку атмосферное давление меняется и во времени, и в пространстве, то продвижение антициклонов и циклонов приводит к деформации земной коры в соответствии с траекторией движения атмосферных вихрей, появлению тепловых аномалий и возникновению землетрясений.

В работах [1, 3] показано, что изменчивость атмосферы является триггером возникновения землетрясений, а также приводит к усилению интенсивности геофизических предвестников [2, 4, 5]. В работе [6] сформирован новый методический подход к краткосрочному прогнозу сейсмических событий. Основой такого подхода является применение атмосферно-циркуляционного предвестника в комплексе с другими геофизическими предвестниками, характерными для рассматриваемой сейсмически активной территории.

В Среднеазиатском и других сейсмически активных регионах Земли спутниковый мониторинг тепловых аномалий и мониторинг других геофизических предвестников не позволяет с высокой вероятностью выявить возможность сейсмического события и точно определить дату землетрясений. Это связано с тем, что тепловые аномалии появляются и существуют несколько суток (от 1 до 14 суток). В какой их этих дней случится землетрясение, установить не удается. Данные сведения можно определить с вероятностью в 75–80 % при использовании атмосферно-циркуляционного предвестника. Роль геофизических предвестников заключается в увеличении вероятности сейсмического события до 95–100 % и уточнении места эпицентра землетрясения.

Например, за шесть дней до сильного землетрясения в штате Гуджарат 26 января 2001 г. (оно унесло жизни около 20 тыс. человек) спутники зафиксировали повышение температуры почвы в этом районе (наибольший ее рост составил 4°). Аномалия температуры отмечена там, где впоследствии ударила стихия, — вдоль главной линии разлома. Тепловые аномалии стали фиксироваться за шесть дней до сильного землетрясения и столько же после, поэтому весьма проблематично определить, в какой из этих дней произойдет катастрофа. Данные атмосферных процессов позволяют достаточно уверенно определить день катастрофы.

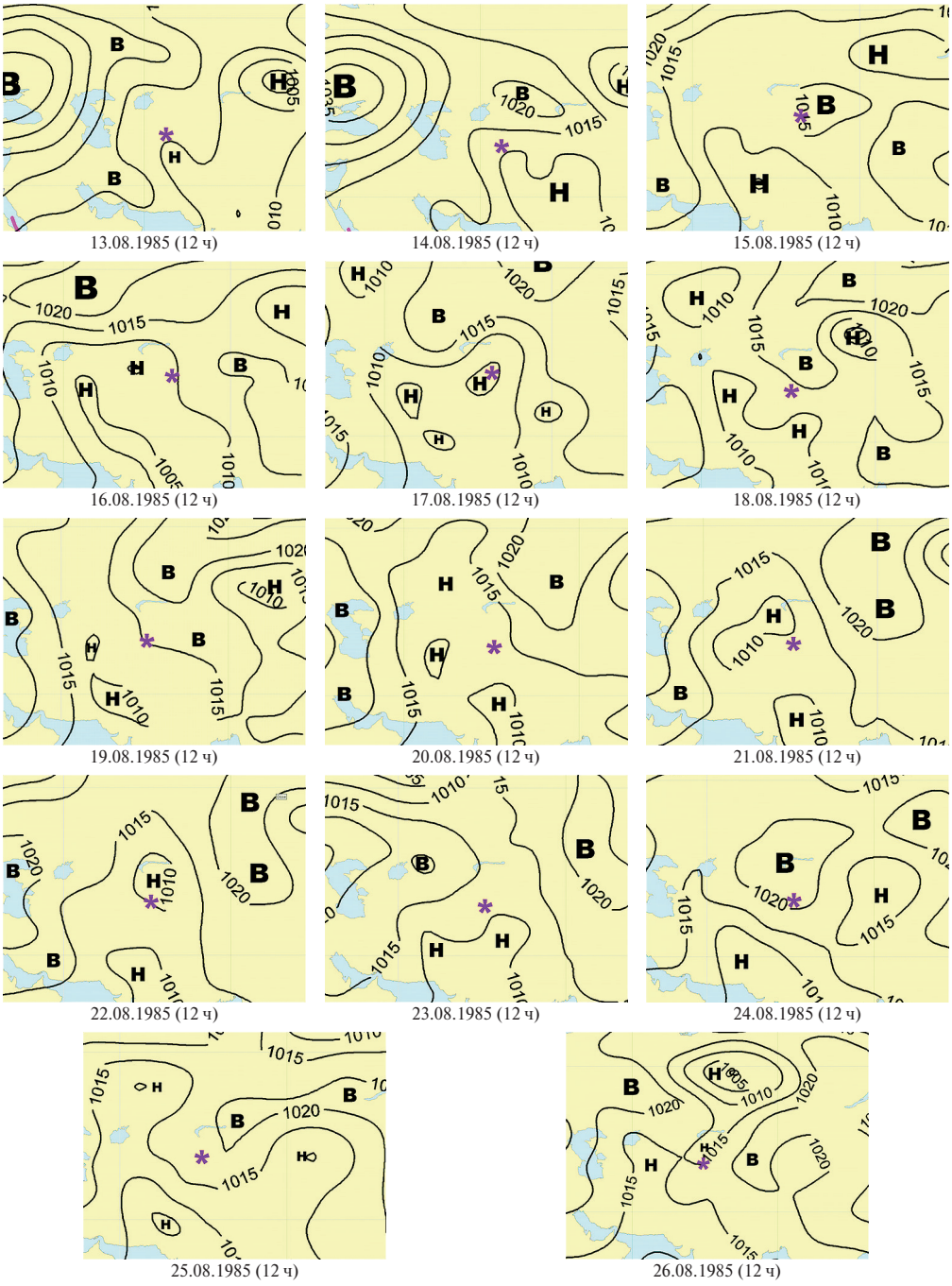
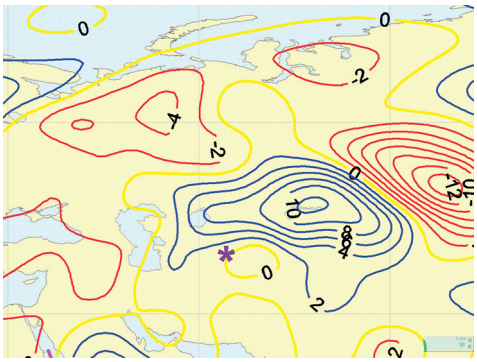
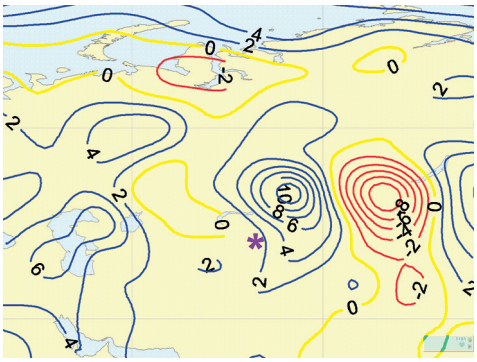


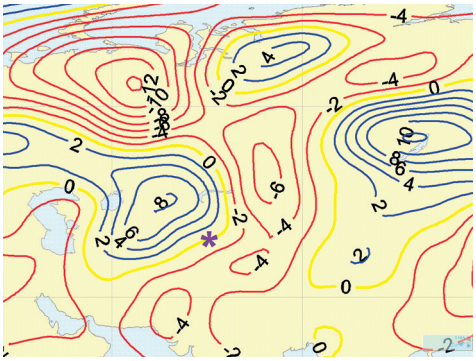
Рис. 2. Изменчивость атмосферной циркуляции в период появления тепловых аномалий и землетрясений в районе Казахстана в мае 1985 г. Знаком * отмечен эпицентр землетрясений



Землетрясение 14 августа 1985 г. с $M = 4{,}2$



Землетрясение 17 августа 1985 г. с $M = 4{,}7$



Землетрясение 23 августа 1985 г. с $M = 7{,}5$

Рис. 3. Расчетные значения барических нагрузок атмосферного давления $\Delta P(r, t)$ для трех землетрясений на территории Казахстана. Знаком * отмечен эпицентр землетрясений

Рассмотрим, что происходило в атмосфере в день катастрофы. На рис. 4 представлены данные регистрации землетрясения, а также поле барических нагрузок в этот день. Из рисунка видно, что место эпицентра четко определяется в соответствии с пространственным положением нулевой изолинией деформации. Также достаточно точно определяется и день катастрофы. В этот день нулевая изолиния деформации «пришла» в сейсмически активный регион. Приведенный пример снова доказывает, что совместный анализ измерения тепловых аномалий и атмосферных процессов позволяет уверенно спрогнозировать сейсмическое событие.

Анализ представленных случаев влияния атмосферных процессов на возникновение тепловых аномалий показывает, что изменчивость атмосферы в подавляющем числе случаев приводит к усилению тепловых аномалий. Данное утверждение означает, что проведение спутникового мониторинга тепловых аномалий совместно с мониторингом атмосферных процессов позволит получить качественный метод, который после дополнительных исследований возможно применить для краткосрочного прогноза землетрясений для регионов, в которых наблюдается появление тепловых

аномалий. Следует подчеркнуть, что увеличение интенсивности геофизических предвестников землетрясений, в том числе и тепловых аномалий, не всегда предшествует возникновению землетрясений. Вероятность возникновения сейсмического события на 75–80 % зависит от типичных для данного региона атмосферно-циркуляционных предвестников [6].

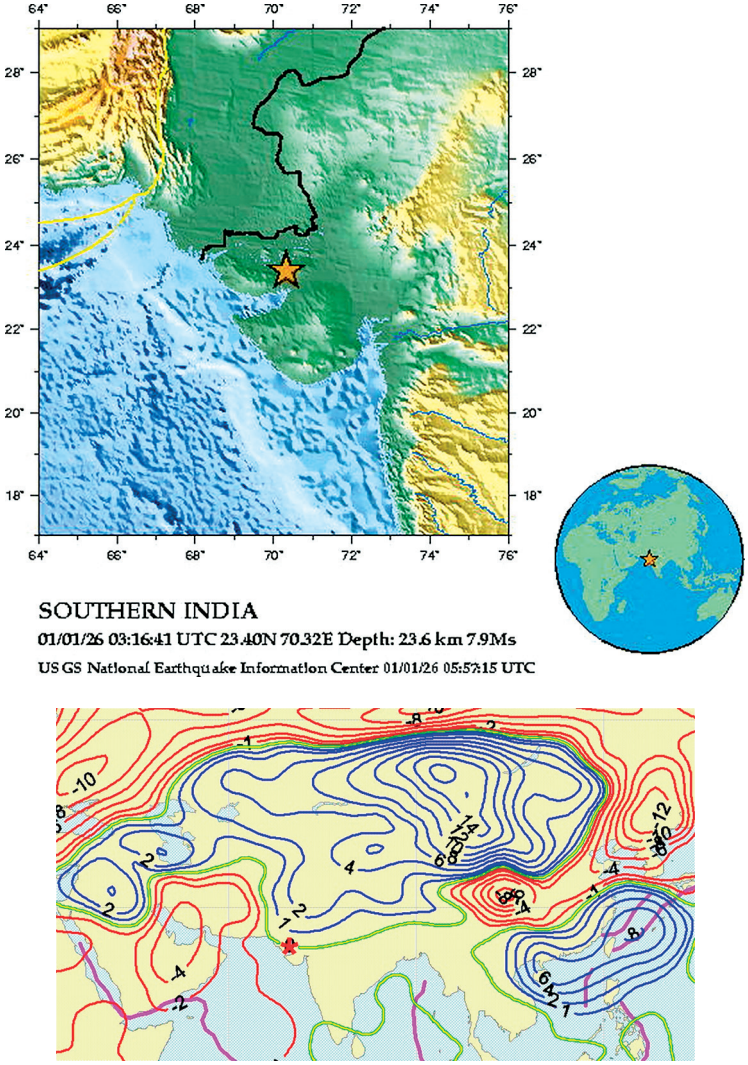


Рис. 4. Данные регистрации землетрясения в штате Гуджарат (верхний); поле барических нагрузок на 26 января 2001 г. (нижний)

Авторы благодарят А.А. Тронина за предоставление данных по тепловым аномалиям.

Литература

1. *Боков В.Н.* Изменчивость атмосферной циркуляции — инициатор сильных землетрясений // Уральский геофизический вестник, УрО РАН, 2004, № 6, с. 5–11.
2. *Боков В.Н.* Увеличение интенсивности проявления геофизических предвестников землетрясений под влиянием изменчивости атмосферного давления. В кн.: Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей // Сборник материалов V межд. конф. чтения Булашевича, УрО РАН, Екатеринбург, 2009, с. 46–50.
3. *Боков В.Н., Гутшабаш Е.Ш., Потиха Л.З.* Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Учёные записки РГГМУ, 2011, № 18, с. 173–184.
4. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Воздействие атмосферной циркуляции на наклоны земной поверхности // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 27, с. 94–99.
5. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Изменчивость геоакустической эмиссии и изменения атмосферной циркуляции // Учёные записки РГГМУ, 2013, № 32, с. 43–54.
6. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Мониторинг геофизических предвестников и прогноз землетрясений // Учёные записки РГГМУ, 2014, № 36, с. 128–138.
7. *Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В.* Уходящее инфракрасное излучение Земли — индикатор сейсмической активности // Доклады АН СССР, 1988, т. 301, № 1, с. 67–69.
8. *Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И.* Об оценке размеров зоны предвестников землетрясений. Моделирование предвестников землетрясений. Под ред. И.П. Добровольского, В.И. Мячкина. — М., 1980, с. 7–44.
9. *Сальман А.Г., Тронин А.А.* Космическая тепловая съемка — новый метод дистанционного изучения сейсмоактивных регионов // Сов. геология, 1989, № 10, с. 90–93.
10. *Сальман А.Г., Тронин А.А.* Вариации потока уходящего ИК излучения Земли в сейсмоактивных районах Средней Азии // Изв. АН СССР, Физика земли, 1990, № 7, с. 67–69.
11. *Теркот Д., Шуберт Д.* Геодинамика. Геологическое приложение физики сплошных сред. Т. 2. — М.: Мир, 1985. — 730 с.
12. *Тронин А.А.* Возможность применения космической тепловой съемки для исследования землетрясений // Исследование Земли из Космоса, 2005.