

## Динамика облачности над геологически активными зонами Украины: диагностическое и прогностическое численное моделирование, приземные и спутниковые наблюдения

© Т. А. Белый<sup>1</sup>, А. М. Пирнач<sup>2</sup>, 2012

<sup>1</sup>Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup>Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Киев, Украина

Поступила 1 сентября 2011 г.

*Представлено членом редколлегии Я. М. Хазаном*

На основе спутниковых снимков, данных наземных гидрометеорологических постов спостережень та діагностичного і прогностичного чисельного моделювання досліджено динаміку хмарності над геологічно активними регіонами Криму на прикладі Кримського півострова. Розглянуто подію 20 вересня 2002 р. — 20 год 42 хв відбувся землетрус класу  $K = 8,8$  з координатами епіцентру  $44,77^\circ$  півн. ш.,  $37,12^\circ$  сх. д. За 8 год до землетрусу на спутникових знімках хмарності було зафіксовано морфологічні змінення хмарового покриву у вигляді лінійної хмарової аномалії (ЛХА). ЛХА розміщувалася над геологічним розломом, який розділяє Скіфську плиту і Кримський мегантиккліній. Згідно з чисельним аналізом еволюції хмарності, одним із можливих чинників появи ЛХА над геологічними розломами Землі є неоднорідний розподіл позитивних і негативних аномалій сили тяжіння.

Dynamics of cloudiness above geologically active regions of Ukraine is studied on an example of the Crimean peninsula based on satellite pictures, data of surface meteorological observation stations and diagnostic and prognostic numerical simulation. The event on September 20, 2002 has been chosen as an example. An earthquake of class  $K = 8,8$  with epicenter coordinates  $44,77^\circ$  n. l.,  $37,12^\circ$  e. l., which happened during that period at 20 h 42 in the Crimea. Morphological changes were registered on the satellite pictures of cloudiness as linear cloudy anomalies (LCA) eight hours before the earthquake. LCA was located above geological fault, which separated the Scythian plate and the Crimean meganticlinorium. Numerical analysis of cloudiness evolution demonstrated that one of the possible factors of LCA appearance above geological faults of the Earth is inhomogeneous distribution of positive and negative anomalies of gravity force.

**Введение.** В последние десятилетия большое внимание уделяется процессам взаимодействия геосфер на границе земная кора — атмосфера [Адушкин и др., 2006; 2008; Гохберг, 2008; Милькис, 1986; Садовский, 1978]. Развитие спутниковой техники и измерительных приборов высокой точности позволили выявить ранее не наблюдаемое явление — атмосферная реакция на подготовку сейсмического события [Ежов, Ищенко, 1983; Морозова, 1980, 1988, 1993, 1997; Садовский и др., 1978].

Вопрос об отклике атмосферы на сейсмическую активность поднимался еще в 19 в. [Мушкетов, 1891]. С того времени многолетние наблюдения показали, что сейсмическая активность находится в тесной связи с атмосферным давлением и проявляется в его резком отклонении от фоновых значений. Во многих случаях изменения происходили за несколько суток до землетрясения [Садовский и др., 1978].

Поскольку изменение атмосферного давления существенно влияет на направление и си-

лу ветра, а также количество осадков, были сделаны предположения, что во время подготовки или свершения сейсмического события должны наблюдаться аномалии (отклонения) как в морфологической структуре атмосферы (связанной с облачностью), так и в ее средних фоновых значениях. Такие морфологические нарушения наблюдал Шлюмберже в 1933 г. относительно связи между формой облаков нижнего яруса и тектоникой [Мушкетов, Мушкетов, 1935, с. 866].

Колебания атмосферы тесно связаны с колебаниями земной коры [Гармаш и др., 1989]. Резкие вариации атмосферы (прохождение глубоких циклонов, фронтов и др.) усиливают микросейсмические колебания земной коры, которые регистрируются сейсмическими станциями [Костина, 1958]. Результаты обработки и анализа микросейсмических колебаний, эманиционного поля природного радона, вариации электрического поля в грунте и магнитного поля в приземном слое атмосферы позволили определить корреляционные соотношения между геофизическими полями на границе земная кора—атмосфера [Адушкин и др., 2006; 2008]. Отмеченная связь обусловлена неоднородной структурой земной коры. Как правило, границы аномалий геофизических полей и соответствующих геологических структур четко совпадают.

Цель настоящей статьи — исследовать динамику облачности накануне землетрясения, произошедшего в Крыму 20.09.2002 г. в 20 ч 42 мин, используя спутниковые снимки, численное моделирование и данные аэрологических и метеорологических постов наблюдений.

**Линейные облачные аномалии.** В ранних работах по изучению взаимосвязи между литосферой и атмосферой, связанных с описанием аномалий в облачном покрове (формирование и распад облачных структур над геологическими разломами), авторами не приводились исходные спутниковые снимки облачности. Их дешифрировали и представляли как условную схему в виде прямых линий, нанесенных на карту (например [Ежов, Ищенко, 1983]), что затрудняло восприятие описанного процесса. Поэтому ниже приведены наиболее интересные спутниковые снимки, на которых прослеживаются аномалии в облачном покрове над геологическими разломами Земли, и детально рассмотрена динамика облачности 20 сентября 2002 г. перед указанным землетрясением.

Согласно работам [Морозова, 1980; 1988; 1993; 1997; Ежов, Ищенко, 1983], реакция облачно-

сти на сейсмическое событие проявляется в виде линейных облачных аномалий (ЛОА) над глубинными разломами и складками Земли. В метеорологии, по морфологической классификации облаков [Атлас ..., 1957], понятие облачного линеамента или облачной аномалии отсутствует. Следуя работе [Морозова, 1980], под облачным линеamentом будем понимать облачный массив большой горизонтальной протяженности с резко выраженными (прямыми или криволинейными) границами, узкие безоблачные зоны внутри облачных массивов или гряды линейно вытянутых облаков при безоблачном небе.

Ввиду того что атмосферу в целом (до высоты 10 км) можно охарактеризовать, как нелинейную термодинамическую систему с быстро меняющимися физическими свойствами, не каждый облачный массив большой горизонтальной протяженности с резко выраженными (прямыми или криволинейными) границами, а также облачную полосу можно связать с реакцией на активизацию геологических разломов Земли. Это обусловлено тем, что длины волн, излучаемые геофизическими источниками, соизмеримы с масштабами тонкой структуры стратификации температуры и ветра в атмосфере. Поэтому в большинстве случаев облачные полосы вызваны внутренними изменениями в атмосфере, такими как прохождение атмосферных фронтов, шквалы и штормы [Hobbs, 1981; Rosenfeld et al., 2006].

Однако если над локальной территорией устанавливается квазистационарное состояние атмосферы, с малыми скоростями ветра, то эффекты, вносимые в возмущения атмосферы над геологическими разломами Земли, проявляют себя более интенсивно, что и фиксируется спутниками в видимом (ТВ) и инфракрасном (ИК) диапазонах (например [Горный и др., 1986; Гохберг, 2008]), а также натурными наблюдениями [Садовский и др., 1978]. Важно отметить, что ЛОА очень сильно зависят от климатологической характеристики региона. В каждом отдельном регионе морфологическая структура ЛОА проявляется по-разному.

Проанализируем ретроспективно по времени серию спутниковых снимков, на которых прослеживаются аномалии в облачном покрове, привлекая данные о сейсмической активности на территории Украины [Сейсмологический ..., 2002; 2006; 2008].

На спутниковом снимке над северо-западной частью акватории Черного моря (рис. 1) хорошо прослеживается ЛОА, которая простирает-

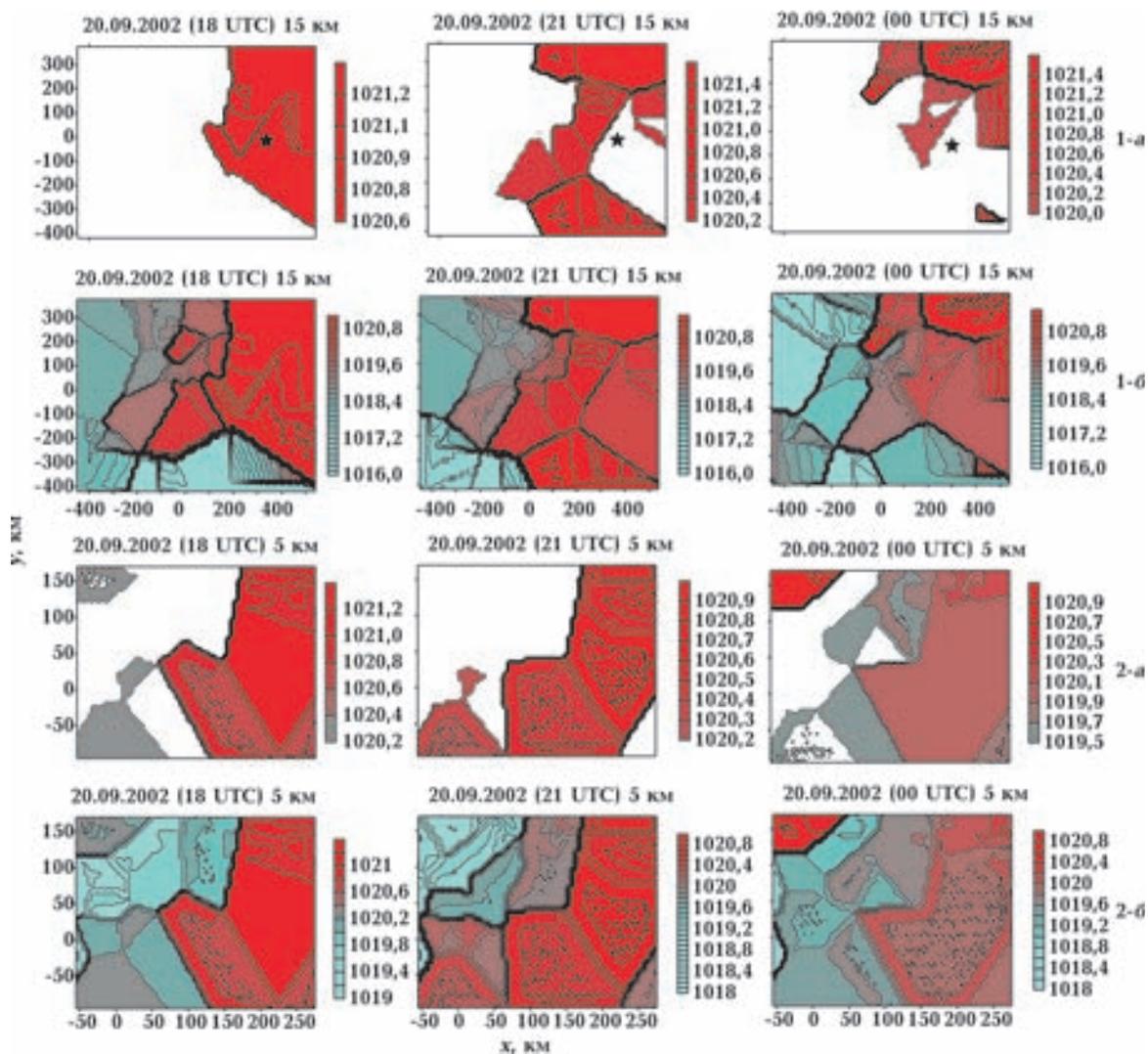


Рис. 10. Распределение измеренного атмосферного давления (гПа) в различные моменты времени: 1 — дальняя зона (а — область повышенного атмосферного давления; б — общий фон атмосферного давления); 2 — ближняя зона (а — область повышенного атмосферного давления, б — общий фон атмосферного давления). Звездочкой обозначен эпицентр землетрясения.

**Т а б л и ц а 2. Максимальные по площади ( $-100 < \delta < 250$  км,  $-100 < y < 150$  км) трехчасовые суммы осадков при различных значениях аномалии силы тяжести  $\Delta g_a$ , мм / 3 ч**

Случай	Время, ч				$\Delta g_a$ , м/с <sup>2</sup>
	3	6	9	12	
1	0,9	2,5	10,1	9,9	0
2	1,0	2,8	4,7	11,2	0,001
3	1,0	4,5	3,6	1,9	0,002
4	1,0	15,1	5,0	7,6	0,02

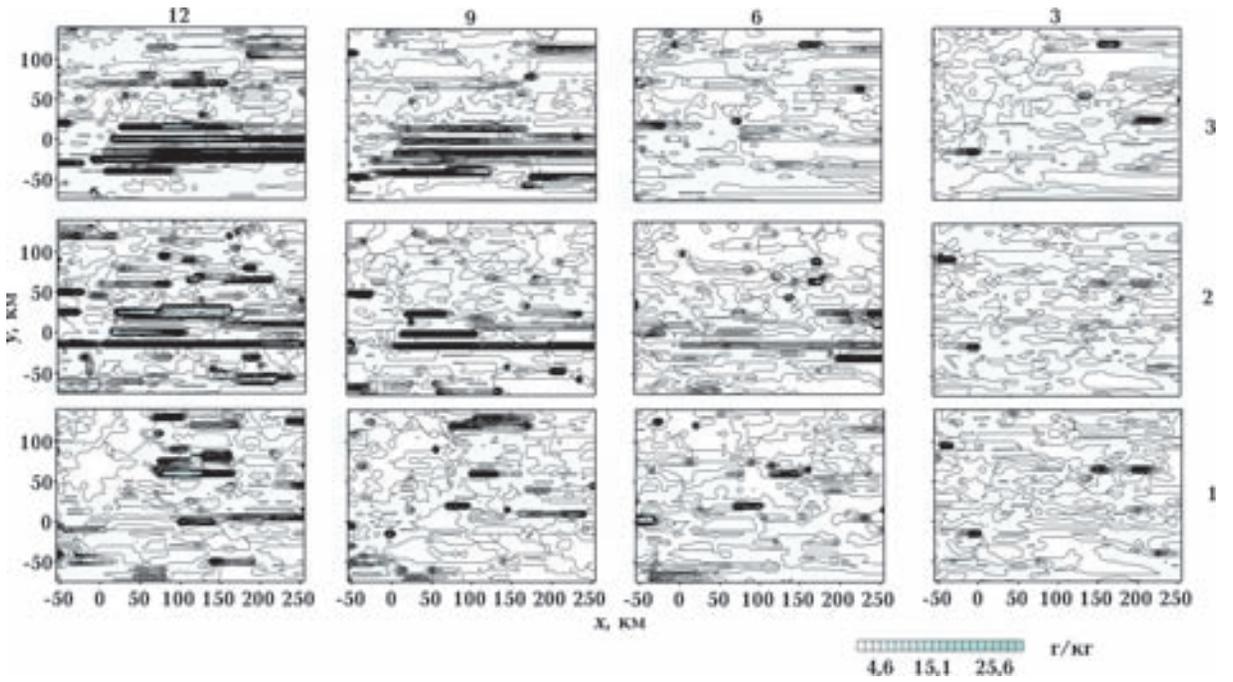


Рис. 11. Эволюция облачности в разные моменты времени при различных значениях  $\Delta g_a$ . Цифры сверху — время; цифры сбоку — номер случая (см. табл. 2).

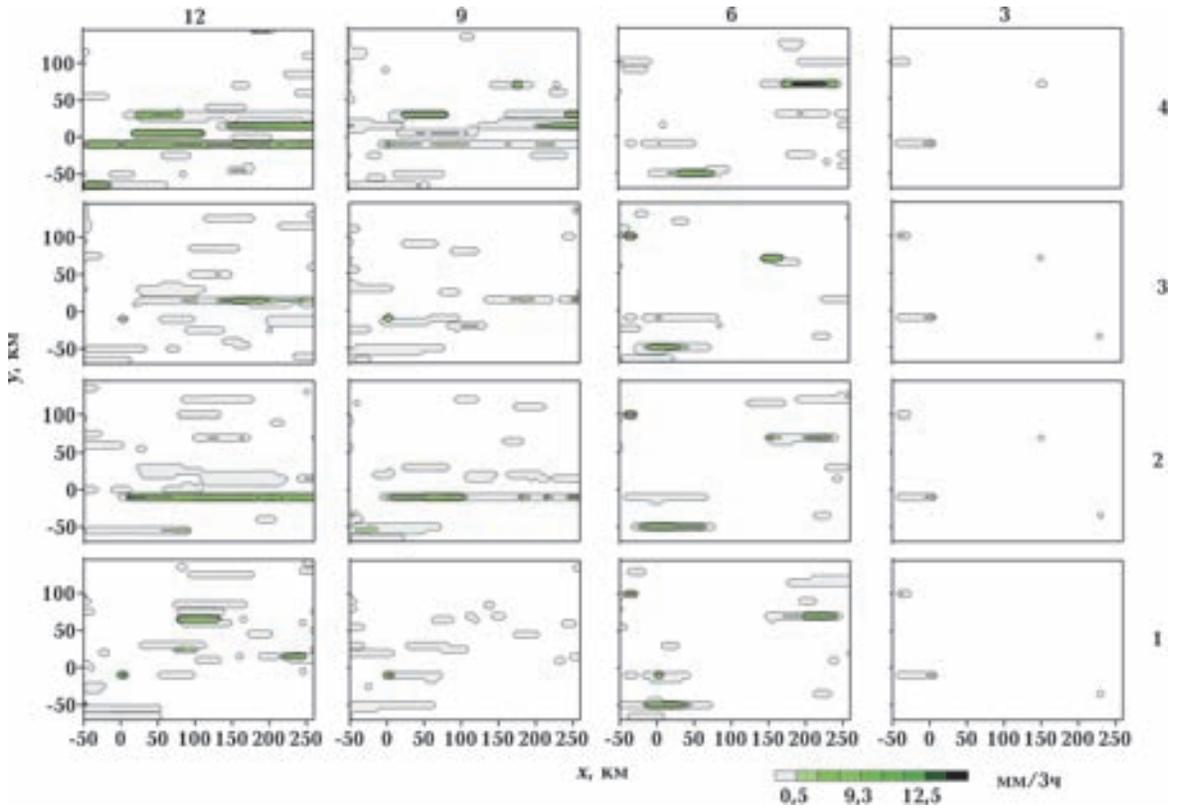


Рис. 12. Эволюция сумм осадков (мм/3 ч) в разные моменты времени при различных значениях  $\Delta g_a$ . Условные обозначения см. на рис. 11.

логические толчки наблюдались в Карпатах 29.08.2006 г., класс  $KD = 7,3$  (8), в 10 ч 33 мин, район г. Свалява (координаты эпицентра  $48,55^\circ$  с. ш.,  $22,97^\circ$  в. д.) и в Венгрии — 30.08.2006 г. в 06 ч 51 мин, класс  $KD = 6,9$  (5) (координаты эпицентра  $48,38^\circ$  с. ш.,  $21,99^\circ$  в. д.). В районе Крымского полуострова сейсмические толчки наблюдались 02.09.2006 г., район 3 (Алуштинский) (координаты эпицентра  $44,56^\circ$  с. ш.,  $34,52^\circ$  в. д.), в 12 ч 12 мин и район 2 (Ялтинский) (координаты эпицентра  $44,22^\circ$  с. ш.,  $34,41^\circ$  в. д.) в 15 ч 26 мин. Согласно международному каталогу землетрясений (<http://earthquake.usgs.gov/>), на 27.08.2006 г. на территориях Румынии, Греции, Турции наблюдались следующие землетрясения (табл. 1).

Левая серия ЛОА хорошо согласуется с Западно-Черноморским разломом и разломом Юго-Западных Балкан [Старостенко и др., 2010]. Правая серия ЛОА расположена вблизи Одесско-Синопской и Западно-Крымской зон разломов [Старостенко и др., 2010].

На спутниковом снимке северо-западной — северо-восточной частей Черного моря и прилегающих акваторий (рис. 4) ЛОА расположены вблизи южной части Крымского полуострова, а также южнее Таманского полуострова. Обращают на себя внимание выбросы газа и пара от грязевых вулканов на Таманском полуострове в виде тонких облачных струй (отмечены кружочками). Согласно [Сейсмологический ..., 2008], 03.10.2008 г. в 15 ч 17 мин в Крыму зафиксировано землетрясение класса  $K = 7,3$ , район 5 — Керченско-Анапский (координаты эпицентра  $44,27^\circ$  с. ш.,  $33,17^\circ$  в. д.).

Как видно из рис. 4, ЛОА расположены над надвигами впадины Сорокина и Керченско-Таманского прогиба [Старостенко и др., 2010].

На спутниковом снимке Азовского и северо-восточной части Черного моря (рис. 5) за-

чтено распространение акустико-гравитационных волн в атмосфере. Согласно [Сейсмологический ..., 2006], в 20 ч 1 мин в Крыму произошло землетрясение класса  $K_{II} = 6,8$ , район 2 (Ялтинско-Алуштинский), с координатами эпицентра  $44,29^\circ$  с. ш. и  $34,20^\circ$  в. д. С явлениями, связанными с акустико-гравитационными волнами в атмосфере, можно ознакомиться в фундаментальной монографии [Гохберг, 2008].

Таким образом, из приведенных выше спутниковых снимков (рис. 1—5) можно сделать следующие предположения: появление ЛОА над геологическими разломами может указывать на то, что в данном регионе активизируется сейсмическая активность.

**ЛОА на спутниковых снимках перед землетрясением 20 сентября 2002 г. в 20 ч 41 мин в Крыму.** Лето и осень 2002 г. характеризовались совокупностью разного рода катастрофических явлений (паводков, штормов, смерчей, градобитий, катастрофических осадков, сверхмощных конвективных облаков, землетрясений и др.) по всей Европе в общем и в Крыму в отдельности. В этот период над Крымским полуостровом наблюдались опасные и особо опасные атмосферные явления:

- 5—10 августа в северной части Крыма количество осадков превысило 3—4 месячные нормы;
- 16 сентября в г. Керчь за несколько часов выпало три месячные нормы осадков;
- 27 сентября в районе г. Балаклава наблюдался смерч.

Наибольший интерес представляет случай наблюдения ЛОА до землетрясения, произошедшего 20.09.2002 г. в 20 ч 41 мин, район 5 (Керченско-Анапский) с координатами эпицентра  $44,77^\circ$  с. ш. и  $37,12^\circ$  в. д.

На рис. 6 представлены спутниковые снимки облачности за 20 сентября в различные моменты времени до землетрясения.

**Т а б л и ц а 1.** Землетрясения, зарегистрированные 27.08.2006 г.

Время, UTC	Координаты, градусы		Магнитуда
	Широта	Долгота	
$10^h 49^m 17^s$	39,46	22,88	3,4
09 16 52	45,57	26,48	3,2
23 02 22	40,38	25,73	3,4

Как видно из рис. 6, а, в 08 ч 51 мин вся северо-западная часть Черного моря и Крымский полуостров были заняты облачным покровом. В окрестностях данного региона ярко выраженной циклонической активности не наблюдалось. Облачность соответствовала внутримассовым процессам, связанным с прохождением холодного фронта (рис. 7, а). Обширный циклон находился над Западной Европой. В 12 ч 02 мин (см. рис. 6, б) облачность из северо-западной части Черного моря сместилась на Крымский полуостров. В тот момент над Крым-

ским полуостровом в облачном покрове образовалась аномалия в виде узкой безоблачной полосы (рис. 6, б, показано стрелкой). Просвет в облачности совпал с геологическим разломом, разделяющим Скифскую плиту и Крымский мегантиклинорий [Гинтов, 2005, с 192]. В 20 ч 22 мин, за 34 мин до сейсмического толчка, над Крымским полуостровом облачность рассеялась, сохранившись в виде узкой полосы (см. стрелку) над тем же геологическим разломом.

**Анализ приземных данных.** Как видно из рис. 7, над территорией Крымского полуострова наблюдалось малоградиентное барическое поле. Анализ приземного давления показал, что в течение суток оно изменялось в пределах от 1018 до 1020 гПа. На отдельных станциях (например, Мысовая и Ишунь) давление в течение 8 ч оставалось на одной и той же отметке 1020 гПа. Данные кольцевых приземных карт погоды использовались при корректировке приземного давления в численном моделировании.

#### **Численное диагностическое моделирование.**

Численные диагностические модели представляют собой комплекс программ по восстановлению мгновенного состояния атмосферы и ее характеристик, а также по подготовке исходных метеорологических полей для трехмерной прогностической численной модели физики облаков. Для этого используются данные аэрологического зондирования, получаемые с регулярной сети метеорологических станций наблюдений. Детально методика построения численных диагностических моделей изложена в монографии [Пирнач, 2008].

При численном моделировании использовались следующие параметры расчетной области. Шаг расчетной сетки по горизонтали составил  $x = y = 5$  км и  $x = y = 15$  км соответственно, по вертикальной координате —  $z = 200$  м. Центральная точка расчета — г. Симферополь ( $x = y = 0$  км).

Как видно из рис. 8, вертикальные движения и скорость конденсации имеют две ярко выраженные полосы. При сравнении этих полос со спутниковым снимком (см. рис. 6, б) заметно значительное сходство с аномалией в облачном покрове. Рассеяние полосы на рис. 8, б свидетельствует о начале разрушения облачного покрова.

Рассмотрим, как изменялось давление 20 сентября 2002 г. над Крымским полуостровом накануне землетрясения. Как указывалось в работах [Мушкетов, 1891; Мушкетов, Мушкетов, 1935; Садовский и др., 1978], накануне земле-

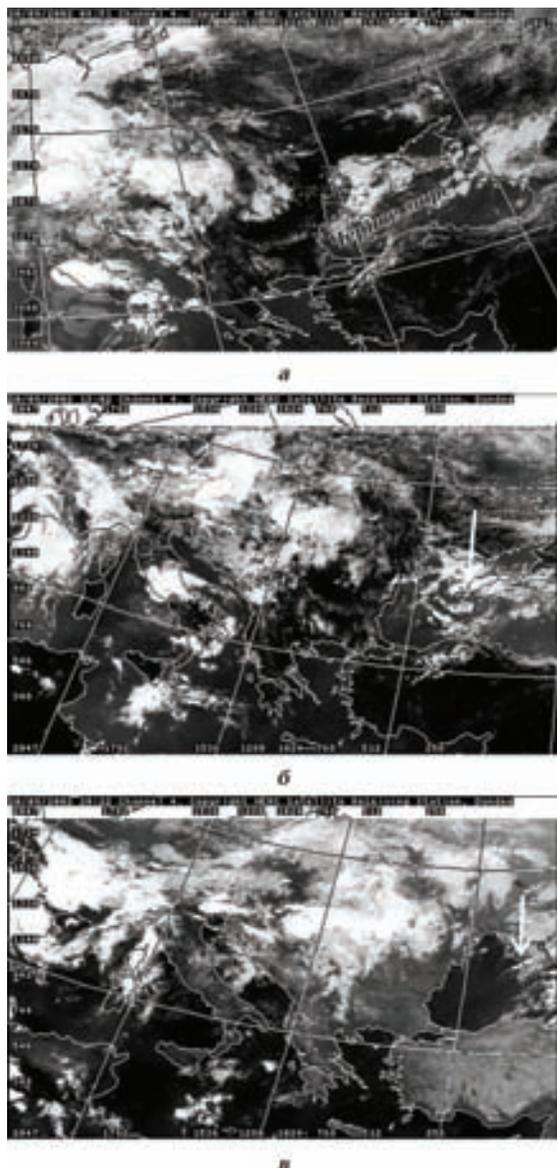


Рис. 6. Спутниковые снимки облачности за 20.09.2002 г. в различные моменты времени. Стрелками показаны аномалии в облачном покрове.

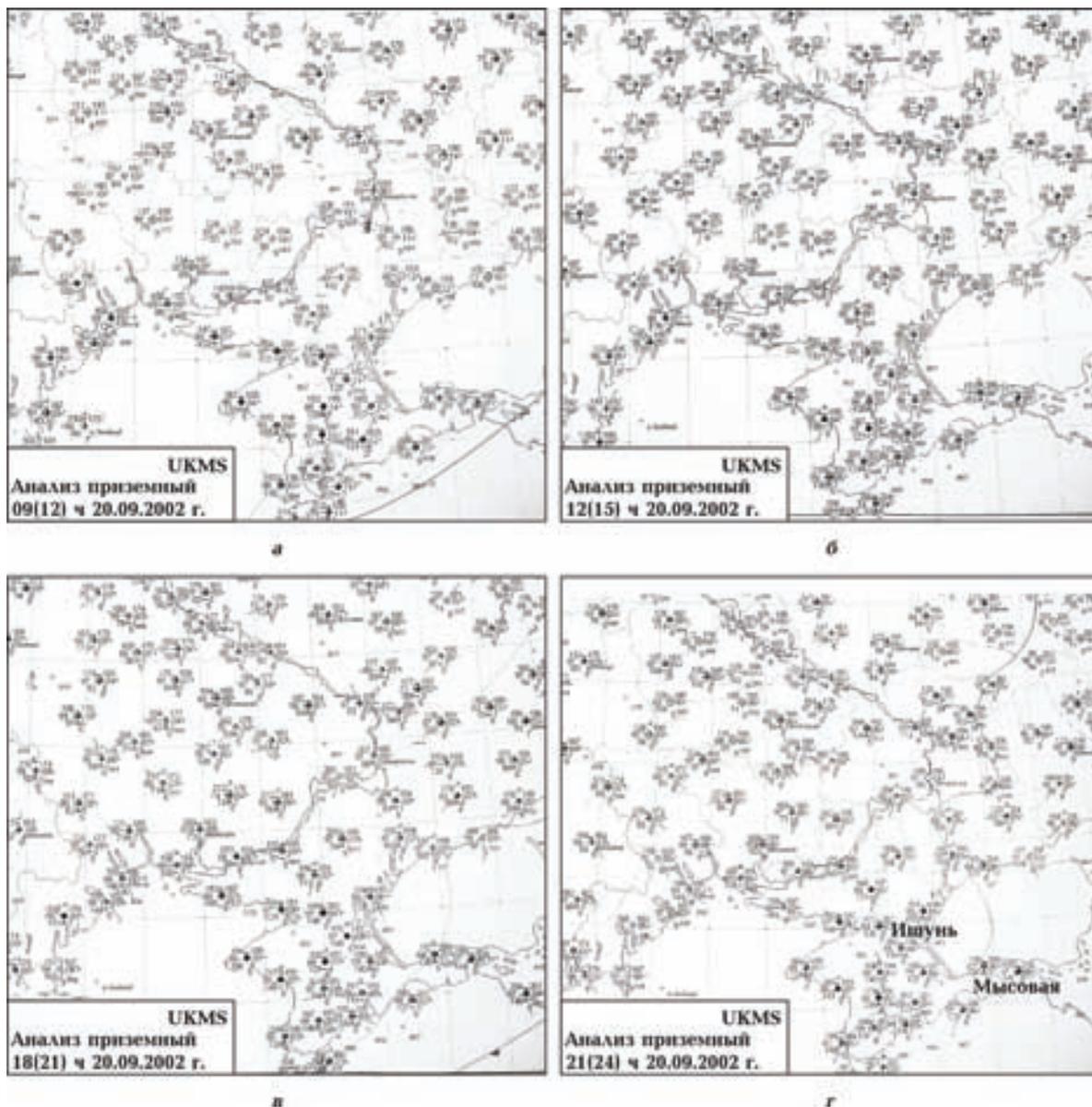


Рис. 7. Фрагменты кольцевых карт погоды Ф-106, 20.09.2002 г.: а — 09.00 UTC; б — 12.00 UTC; в — 18.00 UTC; г — 21.00 UTC.

трясения происходит сбой равновесия функции давления и температуры в эпицентральной зоне и на некотором удалении от нее. Попытаемся проанализировать характерные изменения давления с помощью численных диагностических моделей атмосферы [Пірнач, 2008]. Разобьем расчетную область на ближнюю ( $-50 < x < 250$  км,  $-100 < y < 150$  км, шаг сетки 5 км) и дальнюю ( $-440 < x < 520$  км,  $-420 < y < 440$  км, шаг сетки 15 км) зоны. Эпицентр землетрясения имеет координаты ( $x = 290\text{—}300$  км,  $y = 10\text{—}12$  км) от центральной точки расчета (г. Симферополь ( $x = y = 0$  км)).

Как видно из рис. 9 давление в дневной и ночной периоды существенно различается. Это связано с естественными условиями распределения солнечной энергии (суточный ход температуры). В дневной период давление можно условно подразделить на 3 части: приземный слой до 2 км; слой перемешивания 3—7 км; верхний слой атмосферы 8—14 км. Наибольший интерес представляет распределение давления в ночной период — ввиду отсутствия притока тепла за счет солнечной энергии оно имеет более сложную структуру в форме блоков.

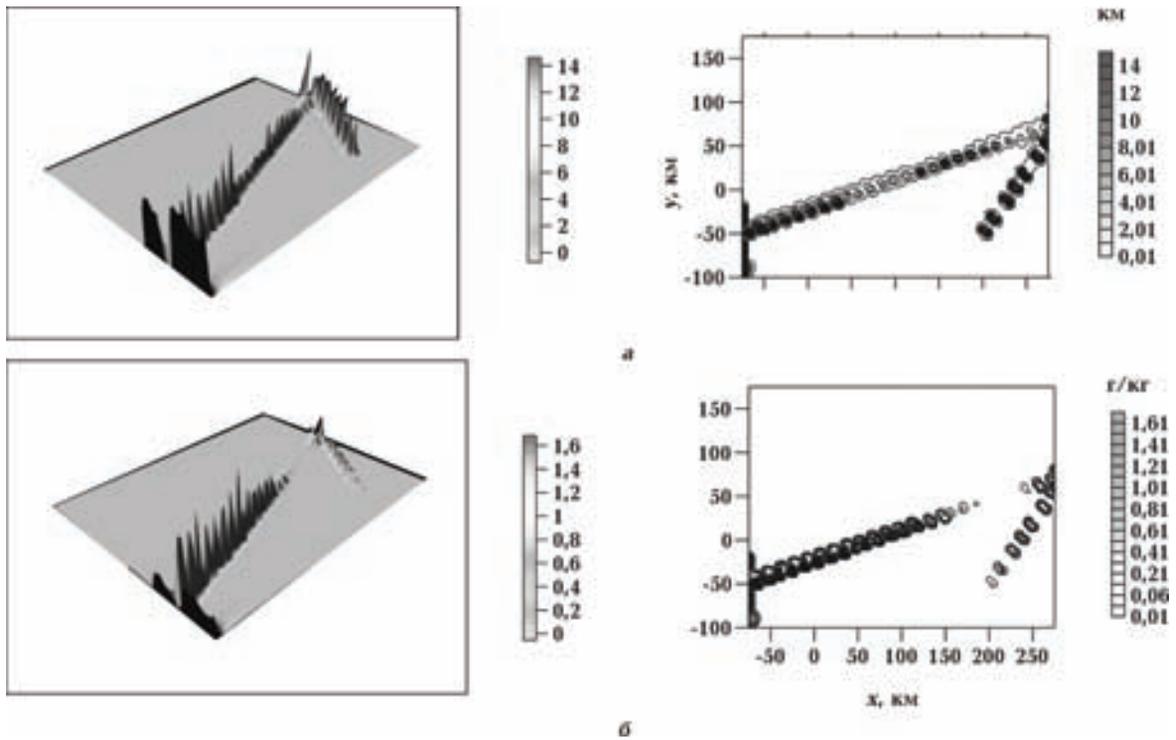


Рис. 8. Интегральные характеристики облачности за 20.09.2002 г. в 12.30 UTC:  
 а — высота слоя с восходящими движениями; б — скорость конденсации.

На рис. 9 обращает на себя внимание следующее: давление над одними и теми же областями характеризуется чередованием зон высокого и низкого давления, т. е. в одних и тех же зонах с высотой происходят сжатие и растяжение барических уровней.

Если проанализировать изменение атмосферного давления по времени, можно заметить следующую закономерность. Накануне землетрясения происходит незначительное повышение атмосферного давления над эпицентральной зоной (рис. 10, 1-а, 18.00 UTC). Через 20 мин после землетрясения зона повышенного давления разбивается на две области (рис. 10, 1-а, 21.00 UTC) с узкой полосой повышенного давления, проходящей вблизи эпицентральной зоны. Через 3 ч после землетрясения давление начинает падать вокруг эпицентральной зоны, но в эпицентре еще остается пятно повышенного атмосферного давления (рис. 10, 1-а, 00.00 UTC). Аналогичные изменения представлены на рис. 10, 2-а для ближней зоны.

Подобные результаты получены при моделировании атмосферного давления 29.09.2002 г. накануне землетрясения, произошедшего в 03.08 UTC в Крыму (координаты эпицентра  $44,78^\circ$  с. ш.,  $34,26^\circ$  в. д.). Как 20, так и 29 сентября давление

перед землетрясением повышалось над эпицентральной зоной, затем в течение 3—6 ч после землетрясения понижалось. Исключение составляют случаи, когда в момент землетрясения над исследуемой областью наблюдался интенсивный циклогенез. Энергии, связанные с внутренними процессами в атмосфере, на несколько порядков превышают энергии литосферно-атмосферных связей. Поэтому проследить их в изменении метеорологических параметрах атмосферы не представляется возможным.

#### Численное прогностическое моделирование.

В качестве отдельного случая проведено предварительное исследование физического механизма образования ЛОА с помощью трехмерной нестационарной модели облачности [Пирнач, 2008; Белый и др., 2009]. Система уравнений состояла из уравнения движения воздуха, неразрывности, уравнения для температуры и влажности, кинетических уравнений для функций распределения облачных частиц и частиц осадков по размерам [Белый и др., 2009]. Ниже приведены те уравнения, в которые вносились изменения.

Появление полос облачности или полос рассеяния в облачном покрове над геологически разломами можно объяснить влиянием не-

однородного распределения положительных и отрицательных аномалий силы тяжести. Согласно работам [Рудяев, 1990; Макоско, Панин, 2002], тангенциальные составляющие силы тяжести вносят вклад в уравнения движения, со-

поставимый с силой горизонтального градиента давления атмосферы, и имеют порядок  $10^{-3} \div 10^{-2}$  см/с<sup>2</sup>.

В метеорологических задачах выбор поверхности — общий земной эллипсоид (ОЗЭ) — в

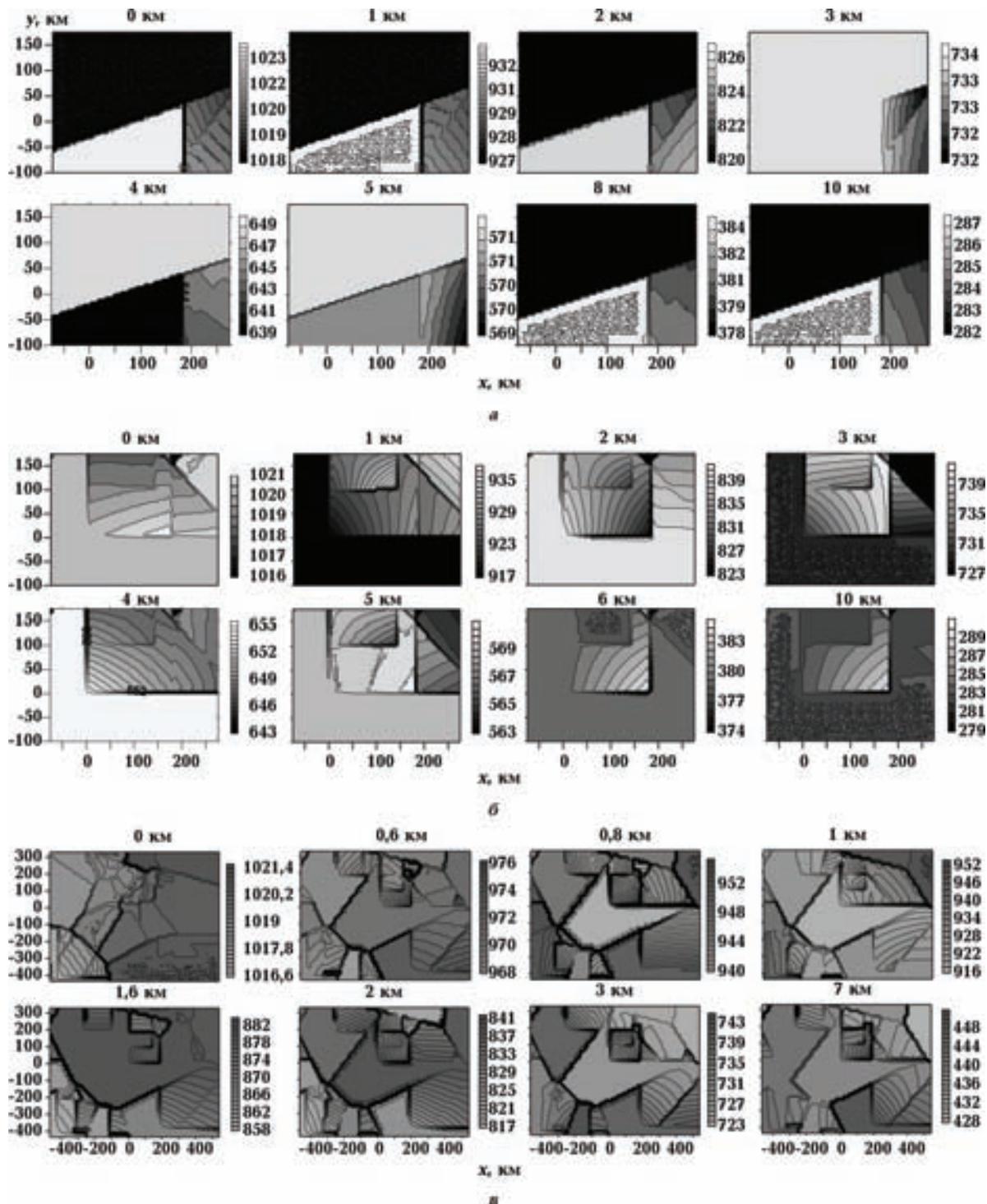


Рис. 9. Поле давления (гПа) на разных высотах: а — без учета орографии, 12.00 UTC; б — то же, 23.30 UTC; в — с учетом орографии, 23.30 UTC.

качестве отсчетной наиболее предпочтителен, поскольку именно к ней приводятся измерения метеорологических величин на Земле.

Точка отсчета на ОЗЭ выбирается следующим образом: ось  $z$  направлена по внешней нормали к ОЗЭ; ось  $x$  — по широте на восток; ось  $y$  — по долготе на север. Таким образом, в первых двух уравнениях движения появляются тангенциальные составляющие ускорения свободного падения. Они обеспечивают учет горизонтальной неоднородности поля силы тяжести.

При увеличении размеров рассматриваемой области в плоскости  $xOy$  не возникает проблем с учетом различия местной вертикали в рассматриваемой точке и в начале координат. Явно имеющие место тангенциальные составляющие вектора  $\mathbf{g}$  обеспечивают учет горизонтальной неоднородности поля силы тяжести, а горизонтальная проекция вертикальной компоненты в силу этого фактора компенсируется соответствующей проекцией вертикальной компоненты давления. Поэтому при увеличении горизонтальных размеров области нужно учитывать искажения, обусловленные использованием картографической проекции, путем введения масштабного множителя.

Тогда, согласно [Макоско, Панин, 2002], уравнения движения [Белый и др., 2009] в декартовой системе координат с учетом тангенциальных составляющих силы тяжести запишем в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = lv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2},$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -l(u + u_f) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + k_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2},$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + k_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2},$$

где  $u, v, w$  — проекции скорости ветра на оси  $x, y, z$ ;  $p$  — давление;  $l$  — ускорение Кориолиса;  $k_z$  — коэффициент вертикального турбулентного обмена;  $\rho$  — плотность воздуха;  $g_x, g_y, g_z$  — проекции вектора силы тяжести на оси рассматриваемой системы координат.

Подробно с методикой динамики атмосферы в неоднородном поле силы тяжести можно ознакомиться в монографии [Макоско, Панин, 2002].

Численное моделирование облаков и осадков с учетом тангенциальных составляющих

силы тяжести требует отдельного исследования и ввиду ограниченности объема публикации будет рассмотрено в следующей статье. Здесь ограничимся лишь одним примером и покажем, что вклад положительных и отрицательных аномалий силы тяжести существен и его нужно учитывать при расчетах облачности и осадков.

Рассмотрим случай ливневых осадков, наблюдавшийся 29.09.2002 г. над Крымским полуостровом. В этот период было зафиксировано землетрясение класса  $K = 7,0$  в 03 ч 08 мин (с координатами эпицентра  $44,78^\circ$  с. ш. и  $34,26^\circ$  в. д., или  $x = 192$  км,  $y = 10$  км от точки расчетной области — г. Симферополь,  $x = y = 0$  км). При численном моделировании учитывались величины аномалии силы тяжести согласно работе [Ентин и др., 2010]. Для свободной атмосферы использовались аномалии Фая. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 11, 12.

Согласно данным табл. 2, случай 1 соответствует расчету без учета аномалий силы тяжести, а случаи 2—4 — с учетом этих аномалий. В случаях 3, 4 значения аномалий силы тяжести были искусственно завышены с целью выяснить максимальный порядок величины сумм осадков.

Как видно из табл. 2, влияние  $\Delta g_a$  на осадки проявляется и по величине, и по времени. Прямой зависимости увеличения сумм осадков по времени от величины  $\Delta g_a$  выявлено не было. Например, для величины  $\Delta g_a = 0,02 \sim (10^{-2} \text{ м/с}^2)$  максимальные суммы осадков проявились в 6 ч и составили 15,1 мм / 3 ч, а к 12 ч уменьшились на половину (см. табл. 2, случай 4). При  $\Delta g_a = 0,001 \sim (10^{-3} \text{ м/с}^2)$  суммы осадков монотонно росли и достигли максимума в 12 ч — 11,2 мм / 3 ч (случай 2). При  $g_a = 0,002 \sim (10^{-3} \text{ м/с}^2)$  суммы осадков были наименьшими в 9 и 12 ч, а в 6 ч — на 50 % превосходили количество осадков без учета аномалий силы тяжести. Такие результаты влияния  $\Delta g_a$  на облачность и осадки в практике численных методов прогноза погоды получены впервые и требуют более детального исследования на большем фактическом материале.

На рис. 11, 12 несложно заметить, что характерная черта для случаев 2—4 (см. табл. 2), где учитывалось влияние  $\Delta g_a$  при численном моделировании, — увеличение полос облачности и осадков.

На рис. 11 облачный покров представлен как интегральная характеристика по высоте и включает сумму жидкой и твердой фаз.

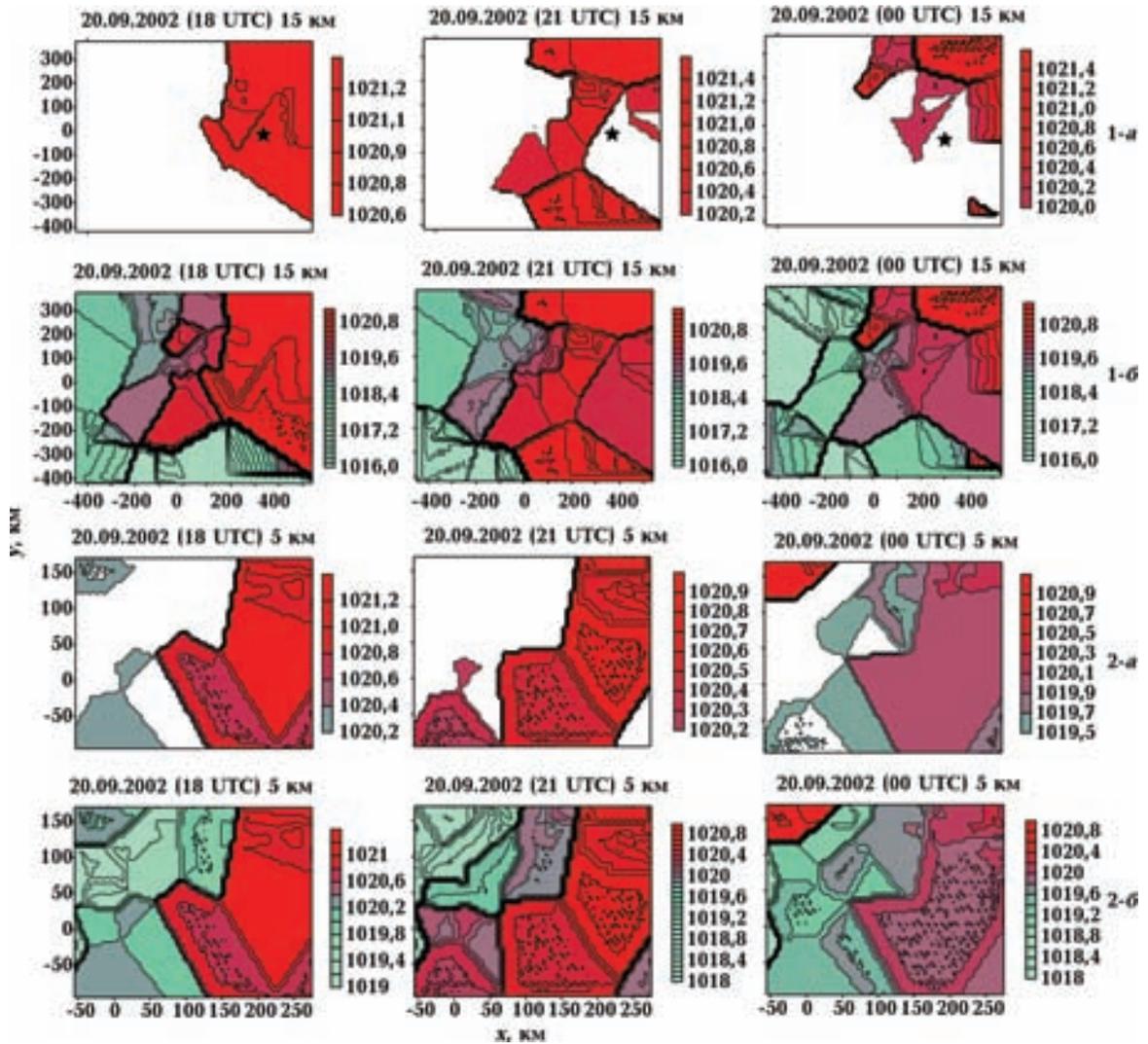


Рис. 10. Распределение измеренного атмосферного давления (гПа) в различные моменты времени: 1 — дальняя зона (а — область повышенного атмосферного давления; б — общий фон атмосферного давления); 2 — ближняя зона (а — область повышенного атмосферного давления, б — общий фон атмосферного давления). Звездочкой обозначен эпицентр землетрясения.

**Т а б л и ц а 2.** Максимальные по площади ( $-100 < x < 250$  км,  $-100 < y < 150$  км) трехчасовые суммы осадков при различных значениях аномалии силы тяжести  $\Delta g_a$ , мм / 3 ч

Случай	Время, ч				$\Delta g_a$ , м/с <sup>2</sup>
	3	6	9	12	
1	0,9	2,5	10,1	9,9	0
2	1,0	2,8	4,7	11,2	0,001
3	1,0	4,5	3,6	1,9	0,002
4	1,0	15,1	5,0	7,6	0,02

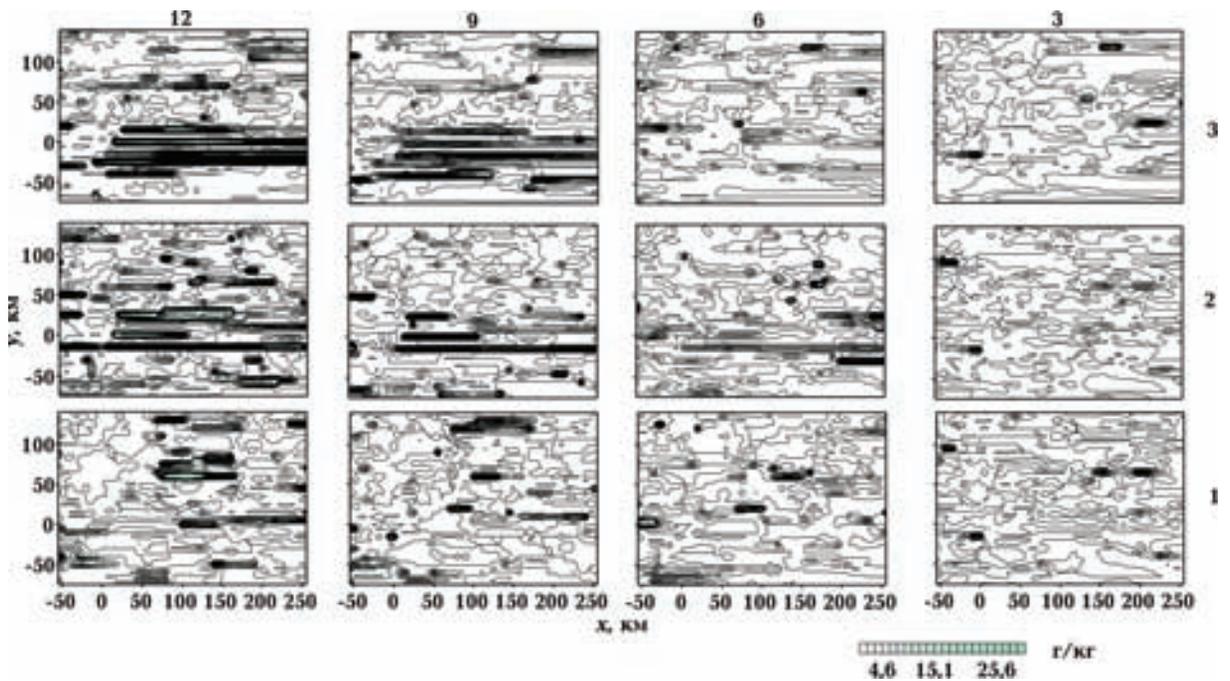


Рис. 11. Эволюция облачности в разные моменты времени при различных значениях  $\Delta g_a$ .  
Цифры сверху — время; цифры сбоку — номер случая (см. табл. 2).

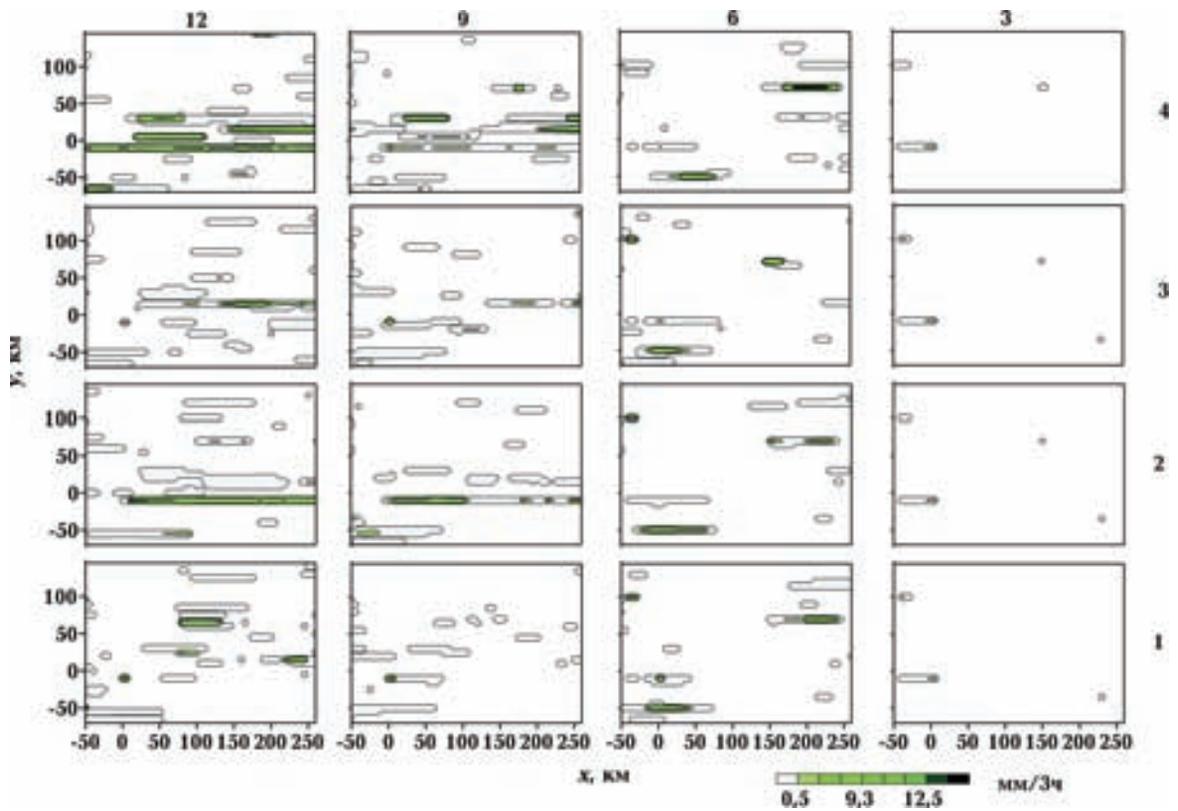


Рис. 12. Эволюция сумм осадков (мм/3 ч) в разные моменты времени при различных значениях  $\Delta g_a$ . Условные обозначения см. на рис. 11.

Как видно из рис. 12, вклад  $\Delta g_a$  в эволюцию осадков заметен даже на первом шаге — 3 ч (случай 4, 5). Максимальный вклад  $\Delta g_a$  в облачность и осадки проявился с 9 до 12 ч в виде серии длинных полос (см. рис. 11, случаи 2, 3 и рис. 12, случаи 2—4), которые отсутствуют без учета  $\Delta g_a$  (случай 1).

**Выводы.** На основе спутниковых снимков, аэрологического зондирования атмосферы и численного моделирования показано, что накануне сейсмической активности в атмосфере происходит отклик данного события в морфологической структуре облаков в виде ЛОА. В большинстве случаев ЛОА наблюдаются над геологическими разломами и могут находиться на расстоянии  $\pm$  (50—200) км от очага сейсмического события. Так как разломы представляют собой особое геологическое и физическое тело, они сопровождаются резкими изменениями геофизических полей. Это могут быть геомагнитные пульсации, возмущение атмосферного электрического потенциала, радиоаврора и др. В гравитационном поле они отображаются резкой сменой значений силы тяжести на узком пространстве. Комбинация этих механизмов способствует образованию ЛОА над геологическими разломами Земли.

Согласно результатам численного моделирования, вклад тангенциальных составляющих силы тяжести в эволюцию облачности и осадков существен и требует более детального изучения. Учет тангенциальных составляющих силы тяжести приводит к увеличению полос облачности и осадков, что может выступать как один из механизмов образования ЛОА над геологическими разломами. Важно отметить, что такие эффекты чаще всего наблюдаются при квазистационарном состоянии атмосферы.

Анализ приземных данных распределения атмосферного давления накануне землетрясения выявил некоторые закономерности в виде незначительного роста давления в эпицентральной части перед землетрясением и его падения в течение 3—6 ч после события. Такие изменения давления очень сильно зависят от состояния атмосферы. В моменты развитого циклогенеза данные эффекты сглаживаются ввиду малости их порядка по отношению к внутренним процессам в атмосфере. Поэтому выявление указанных эффектов не представляется возможным.

*Авторы благодарны g-ру физ.-мат. наук Я. М. Хазану за оказанное внимание к настоящей статье, ценные замечания и советы.*

### Список литературы

- Агушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора—атмосфера // Физика Земли. — 2006. — № 7. — С. 34—51.
- Агушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // Физика Земли. — 2008. — № 6. — С. 77—85.
- Атлас облаков / Под ред. А.Х. Хргиана. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1957. — 68 с.
- Белый Т.А., Пирнач А.М., Дугарь С.Н. Численные исследования влияния различных механизмов осадкообразования на эволюцию мезомасштабных облачных образований, обусловивших сильные осадки в Карпатах 21—29 июля 2008 года // Геофиз. журн. — 2009. — 31, № 6. — С. 107—123.
- Гармаш С.В., Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Швед Г.М. Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1989. — 25, № 12. — С. 1290—1299.
- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. — Киев: Феникс, 2005. — 569 с.
- Горный В.И., Сальмак А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли — индикатор сейсмической активности // Докл. АН СССР. — 1988. — 301, № 1. — С. 67—69.
- Гохберг М.Б. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. — Москва: Наука, 2008. — 296 с.
- Ежов Б.В., Ищенко Л.И. Отображение тектонических структур в строении облачного и ледового покровов // Морфоструктурные исследования на Дальнем Востоке. — Владивосток, 1983. — С. 114—119.
- Ентин В.А., Гинтов О.Б., Гуськов С.И. Еще раз о природе Крымской гравитационной аномалии // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 6. — С. 119—134.

- Костина А. Ф.* О связи микросейсмических колебаний, наблюдаемых в Крыму, с метеорологической обстановкой над Черным морем // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. — 1958. — № 8. — С. 1029—1032.
- Макоско А. А., Панин Б. Д.* Динамика атмосферы в неоднородном поле силы тяжести. — Санкт-Петербург: РГМУ, 2002. — 244 с.
- Милькис М. Р.* Метеорологические предвестники сильных землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1986. — № 3. — С. 36—47.
- Морозова Л. И.* Проявление Главного Уральско-го разлома в поле облачности на космических снимках // Исследование Земли из космоса. — 1980. — № 3. — С. 101—103.
- Морозова Л. И.* Облачные автографы земных недр // Природа. — 1988. — № 5. — С. 55—56.
- Морозова Л. И.* Облачные индикаторы геодинамики земной коры // Физика Земли. — 1993. — № 10. — С. 108—112.
- Морозова Л. И.* О современных тектонических процессах Туранской плиты и ее горного обрамления (по динамике линейных облачных аномалий над разломами и землетрясениям) // Физика Земли. — 1997. — № 5. — С. 65—72.
- Мушкетов И. В.* Физическая геология. Курс лекций. — Санкт-Петербург: Типография М. М. Стасюлевича, 1891. — Ч. 1. — 710 с.
- Мушкетов И. В., Мушкетов Д. И.* Физическая геология. — Ленинград; Москва: ОНТИ НКТП, 1935. — Т. 1. — 908 с.
- Пирнач Г. М.* Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтів. — Київ: Ніка-Центр, 2008. — 294 с.
- Рудяев Ф. И.* Влияние аномального гравитационного поля Земли на циркуляционные системы атмосферы // Докл. АН СССР. — 1990. — 310, № 6. — С. 1345—1348.
- Саговский М. А., Баннов Ю. А., Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х.* Явление сбоя равновесного состояния функций температуры и давления в атмосфере и замкнутых объемах перед землетрясениями // Прогноз землетрясений. — 1978. — № 3. — С. 242—266.
- Сейсмологический бюллетень Украины за 2002 г.* — Симферополь, 2004. — 132 с.
- Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 г.* — Симферополь, 2008. — 134 с.
- Сейсмологический бюллетень Украины за 2008 г.* — Севастополь, 2010. — 180 с.
- Старостенко В. И., Макаренко И. Б., Русаков О. М., Пашкевич И. К., Кутас Р. И., Легостаева О. В.* Геофизические неоднородности литосферы мега-впадины Черного моря // Геофиз. журн. — 2010. — 32, № 5. — С. 3—20.
- Hobbs P. V.* Mesoscale structure in midlatitude frontal system // Proc. JAMAP Symp., Hamburg, Aug. — 1981. — P. 1—8. — Hamburg, 1981.
- Rosenfeld D., Kaufman Y. J., Koren I.* Switching cloud cover and dynamical regimes from open to closed Benard cells in response to the suppression of precipitation by aerosol // Atmos. Chem. Phys. — 2006. — 6. — P. 2503—2511.