

УДК 551.511.331

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК (НА ПРИМЕРЕ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 г.)

© 2023 г. А. В. Шитов^{1, *}, С. А. Пулинец^{2, **}, П. А. Будников^{3, ***}

¹Горно-Алтайский государственный университет (ГАГУ), Горно-Алтайск, Россия

²Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

³Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Фёдорова (ИПГ Росгидромет), Москва, Россия

*e-mail: sav103@yandex.ru

**e-mail: pulse@rssi.ru

***e-mail: pavel9860@gmail.com

Поступила в редакцию 04.01.2023 г.

После доработки 03.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

Проанализировано влияние подготовки Чуйского землетрясения 27 сентября 2003 г. – сильнейшего события в Алтае-Саянской складчатой области за весь инструментальный период сейсмологических наблюдений, на метеорологические характеристики в регионе Горного Алтая (температуру, относительную влажность, поправку атмосферного химического потенциала, скрытую теплоту испарения, средние значения и дисперсию этих данных) и их спектральные характеристики. Показано, что метеорологические и спектральные характеристики меняются за определенное время до основного толчка. Спектральные характеристики отчетливо меняются не только при подготовке основного толчка, но и при афтершоковом процессе.

DOI: 10.31857/S0016794023600011, EDN: OOMGEO

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных результатов исследований предвестников землетрясений последних лет является тот факт, что прогноз, базирующийся на анализе вариаций какого-то одного из параметров окружающей среды, будь то вариации радона, электрического поля или электронной концентрации в ионосфере, не может быть достоверным в силу сложности механизма генерации предвестников разного типа. Одновременная регистрация целого ряда признаков, называемых предвестниками, и являющихся проявлением процесса подготовки землетрясения в различных геофизических средах, и является тем фактором, или комплексным предвестником, на базе которого можно строить надежный прогноз [Pulinets and Ouzonov, 2011]. Более глубокий анализ показывает, что реальные предвестники находятся в синергетической связи и их совместное поведение указывает на приближение системы к критической точке [Pulinets, 2011]. Исходя из этих положений при анализе характеристик, предшествующих землетрясениям, мы использовали максимально доступное число параметров, являющихся индикаторами финальной стадии подготовки землетрясения.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа нами использовались следующие данные.

1. Данные по Чуйскому землетрясению (2003 г.).

2. Данные по метеорологическим характеристикам по сети ГМС Горного Алтая [Всероссийский ..., 2023]. Координаты ГМС: Кош-Агач – 88°40′ E, 50°00′ N, Горно-Алтайск – 85°58′ E, 51°57′ N, Усть-Кокса – 85°37.2′ E, 50°16.332′ N (рис. 1).

3. Данные с сайта NASA Global Modeling and Assimilation Office, атмосферная модель MERRA.

Для изучения влияния процесса подготовки землетрясений на поправку атмосферного химического потенциала были использованы данные по изменению метеорологических параметров перед Чуйским землетрясением.

Согласно модели физико-химических связей в системе “Литосфера–Атмосфера–Ионосфера” в период подготовки землетрясения в пограничном слое атмосферы значительно увеличивается концентрация крупных кластерных ионов, соответственно уменьшается влажность атмосферного воздуха и повышается его температура. На высоте 9–12 км на уровне верхней границы облаков



Рис. 1. Схема расположения эпицентра Чуйского землетрясения (2003 г.) и анализируемых гидрометеостанций (ГМС).

наблюдаются аномальные вариации потока уходящего длинноволнового инфракрасного излучения (аномалии OLR), а в ионосфере – локализованные неоднородности с повышенными (или пониженными) значениями концентрации электронов [Pulinets and Ouzounov, 2018].

Процесс образования крупных кластерных ионов можно проследить по динамике изменения значения энергии связи между ионами и молекулами воды. Изменение значения энергии связи выражается формулой (1), предложенной в работах [Боярчук и др., 2006, 2010; Пулинец и др., 2015; Cesped, 2015]:

$$\Delta U = 5.8 \times 10^{-10} (20T + 5463)^2 \ln(100/H), \quad (1)$$

где ΔU , эВ – поправка атмосферного химического потенциала, или изменение значения энергии связи; T , °С – температура воздуха; H , % – относительная влажность воздуха.

По сути, энергия связи молекул воды с ионом есть химический потенциал в момент конденсации, а формула – поправка атмосферного химического потенциала (1), дающая оценку превышения энергии связи молекулы с ионом по сравнению с

постоянной скрытой теплоты. В дальнейшем тексте для краткости мы будем обозначать поправку атмосферного химического потенциала аббревиатурой АХП [Пулинец и др., 2015].

При этом можно проверить возможные изменения, связанные с процессом стабилизации ионизированных частиц и его энергии взаимодействия с водяными парами в воздухе на основе анализа скрытой теплоты испарения $L(T)$ (2):

$$L(T) = 2500.8 - 2.36Td + 0.0016Td - 0.00006Td, \quad (2)$$

где Td – температура точки росы, измеренная в °С, [Rogers and Yau, 1989].

Если этот процесс достигает уровня значительного влияния, проявляются следы скрытого тепла вокруг эпицентральной зоны, поэтому будущий эпицентр может проследиваться из космоса через спутниковые данные [Deu and Singh, 2003].

На примере Чуйского землетрясения 2003 г. в Алтае-Саянском горном регионе мы приводим анализ влияния процесса подготовки землетрясения на параметры атмосферы, включая метеопараметры (температура, влажность), АХП и скрытой теплоты испарения.

Для изучения периодичности изучаемых процессов нами использовалась методика спектрально-временного анализа временных рядов в скользящем окне [Ландер и др., 1975]. Длина окна выбиралась кратной периодам исследуемых ритмов. Результат отображался в виде спектрально-временной диаграммы [Гамбурцев и др., 2002]. На оси абсцисс откладывались даты измерений изучаемых параметров. На оси ординат откладывались величины частот в циклах в единицу времени (в нашем случае циклов в сутки) или соответствующие периоды. Периоды и циклы имеют между собой обратное соотношение. Более сильная зачерненность на диаграммах соответствует большим спектральным амплитудам. О величине амплитуд судят по шкале уровней, помещенной возле диаграммы. Повторяемость и устойчивость периодичностей выражается в виде зачерненных полос. Для удобства нами были вынесены в цифрах устойчивые периодичности изучаемых процессов.

3. ЧУЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ (2003 г.)

27 сентября 2003 г. в 11:33:24.94 по Гринвичу на территории Республики Алтай в долине р. Чуя в горной перемычке между Чуйской и Курайской межгорными котловинами произошло землетрясение с магнитудой $M = 7.3$ по шкале Рихтера (координаты эпицентра – 49.999° N , 87.852° E) (рис. 1) [Гольдин и др., 2004, 2005; Еманов и Лескова, 2005; Арефьев и др., 2006; Рогожин и др., 2007; Новиков и др., 2008; Еманов и др., 2014]. Интенсивность сейсмических колебаний в эпицентре достигала 9 баллов. Нами изучался форшоковый период с 01.08.2003 г. и афтершоковый период до 31.12.2003 г.

3.1. Вариации температуры

Согласно ранним публикациям [Милькис, 1986] в регионе (в данном случае, в Средней Азии), где повышается сейсмическая активность, среднемесячная/сезонная температура выше, чем климатическая норма. Этот факт проверялся неоднократно в других регионах – Мексике и Китае [Pulinets et al., 2006; Jing et al., 2013]. Мы проверили этот индикатор по данным Государственной службы по метеорологии и мониторингу окружающей среды по Республике Алтай (ГМС) за период с 2000 по 2006 г. для ст. Кош-Агач, находящейся в зоне подготовки Чуйского землетрясения. Данные по среднемесячной температуре сентября за эти годы представлены на рис. 2. Как видим, среднемесячная температура сентября в 2003 году является максимальной за исследуемый промежуток времени. Учитывая достаточно низкие температуры, характерные для сентября в Горном Алтае, трудно ожидать большой разницы в температуре по сравнению с другими годами, тем не менее, мы можем сказать, что наблюдаемая картина подтверждает данные, полученные в ряде других публикаций [Шитов, 2006; Аптикаева и Шитов, 2014].

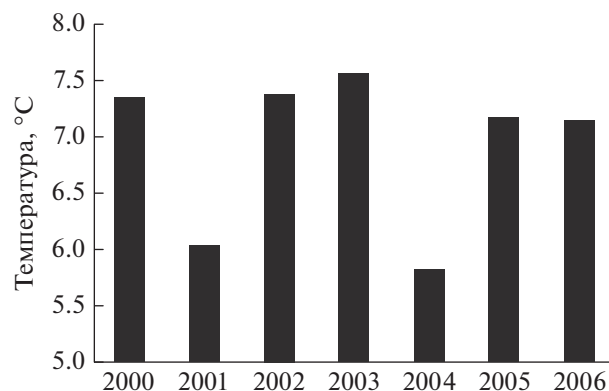


Рис. 2. Среднемесячная температура сентября в 2000–2006 гг. (по данным ГМС Кош-Агач).

При анализе данных Государственной службы по метеорологии и мониторингу окружающей среды по Республике Алтай было выявлено, что за более чем двухнедельный период наблюдений перед Чуйским землетрясением амплитуда суточного хода резко меняется 22.09.2003 и 23.09.2003 г. Отмечено существенное снижение среднесуточных температур 25.09.2003 и 26.09.2003 г., т.е. в сроки непосредственно перед землетрясением для ГМС Горно-Алтайск и Кош-Агач [Шитов, 2006]. Накопленный опыт мониторинга геофизических полей и геодинамических явлений свидетельствует о существовании взаимосвязи этих явлений как с внешними по отношению к геосферам космофизическими факторами, так и с эндогенной активностью Земли. Явления в системе атмосфера–ионосфера и активные геодинамические процессы в земной коре представляются взаимообусловленными [Shitov, 2012; Аптикаева и Шитов, 2014; Artikaeva and Shitov, 2016].

Динамика температуры перед Чуйским землетрясением по всем изучаемым ГМС (Кош-Агач, Горно-Алтайск, Усть-Кокса) (рис. 3а) выделяется резким понижением температуры 22.09 и повышением – 09.09 и 18.09.2003 г., основной толчок произошел при увеличении среднесуточной температуры. Нами для сокращения количества графиков в статье было решено показывать данные только по ГМС Горно-Алтайск, данные по остальным метеостанциям будут показаны как корреляции между ГМС Горно-Алтайск и другими метеостанциями с описанием изменений.

Коэффициенты корреляции между значениями температуры за период времени с 01.08 по 31.12.2003 г. по данным ГМС Кош-Агач, Горно-Алтайск, Усть-Кокса составили соответственно: Горно-Алтайск и Кош-Агач – 0.90, Кош-Агач и Усть-Кокса – 0.95, Горно-Алтайск и Усть-Кокса – 0.895, доверительная корреляция при уровне значимости $0.001 R_{\text{крит}} = 0.14$. Необходимо отметить, что повышение температуры 08.09 и 18.09.2003 г.

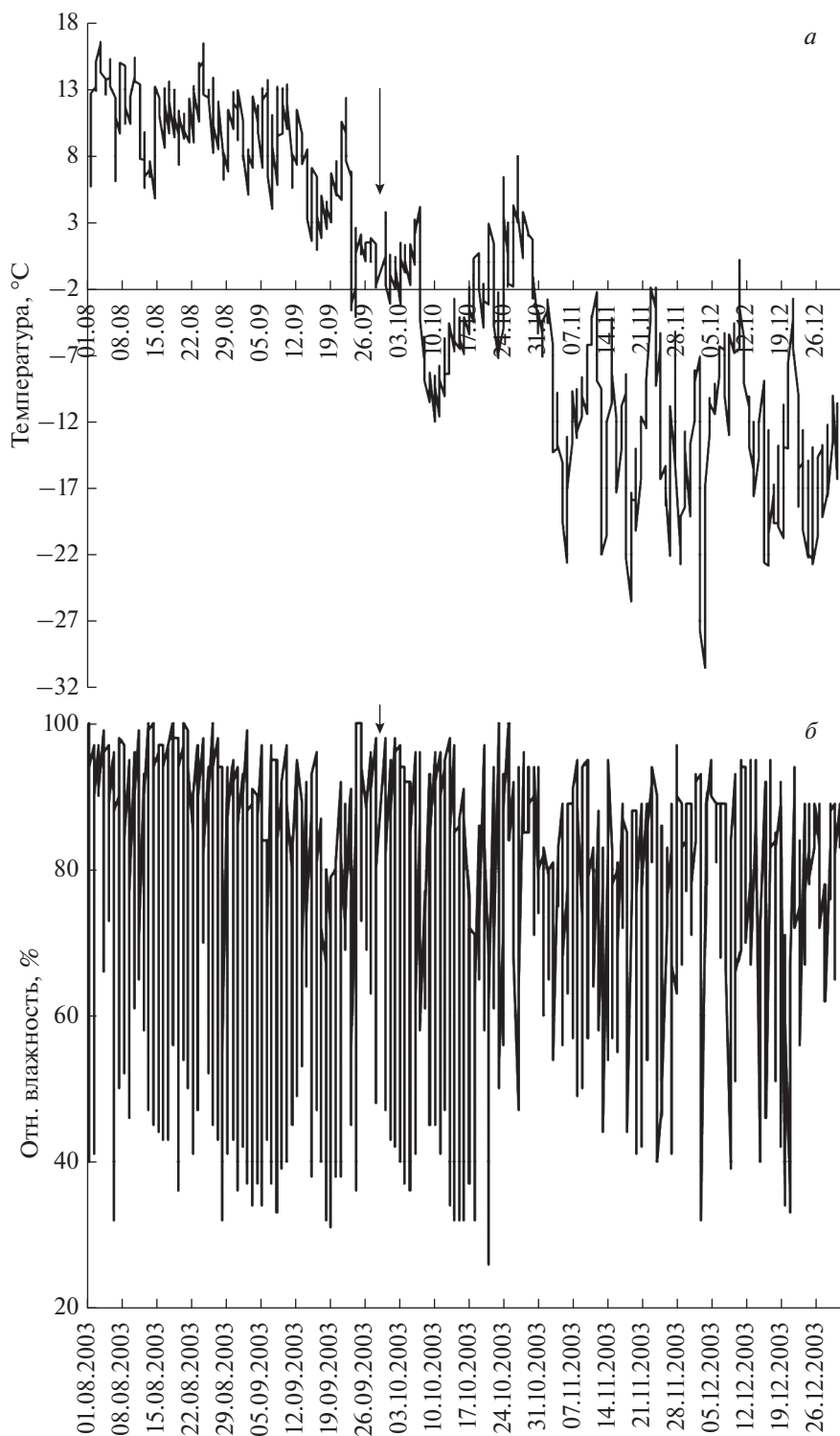


Рис. 3. Динамика температуры (а) и влажности (б) по данным ГМС Горно-Алтайск за период 01.08.2003–31.12.2003 г. Стрелка – момент землетрясения.

совпадают с подобными аномальными повышениями АХП.

Спектрально-временной анализ изменения температуры за данный период на данных ГМС выявил следующие особенности (рис. 3б). Отме-

чено отсутствие периодичности вариаций температуры в 50 дней с 20 по 30.08.2003 г. С 01.09 появляется периодичность температуры в 12.5 сут. В то же время необходимо отметить, что момент Чуйского землетрясения также существенно изменил

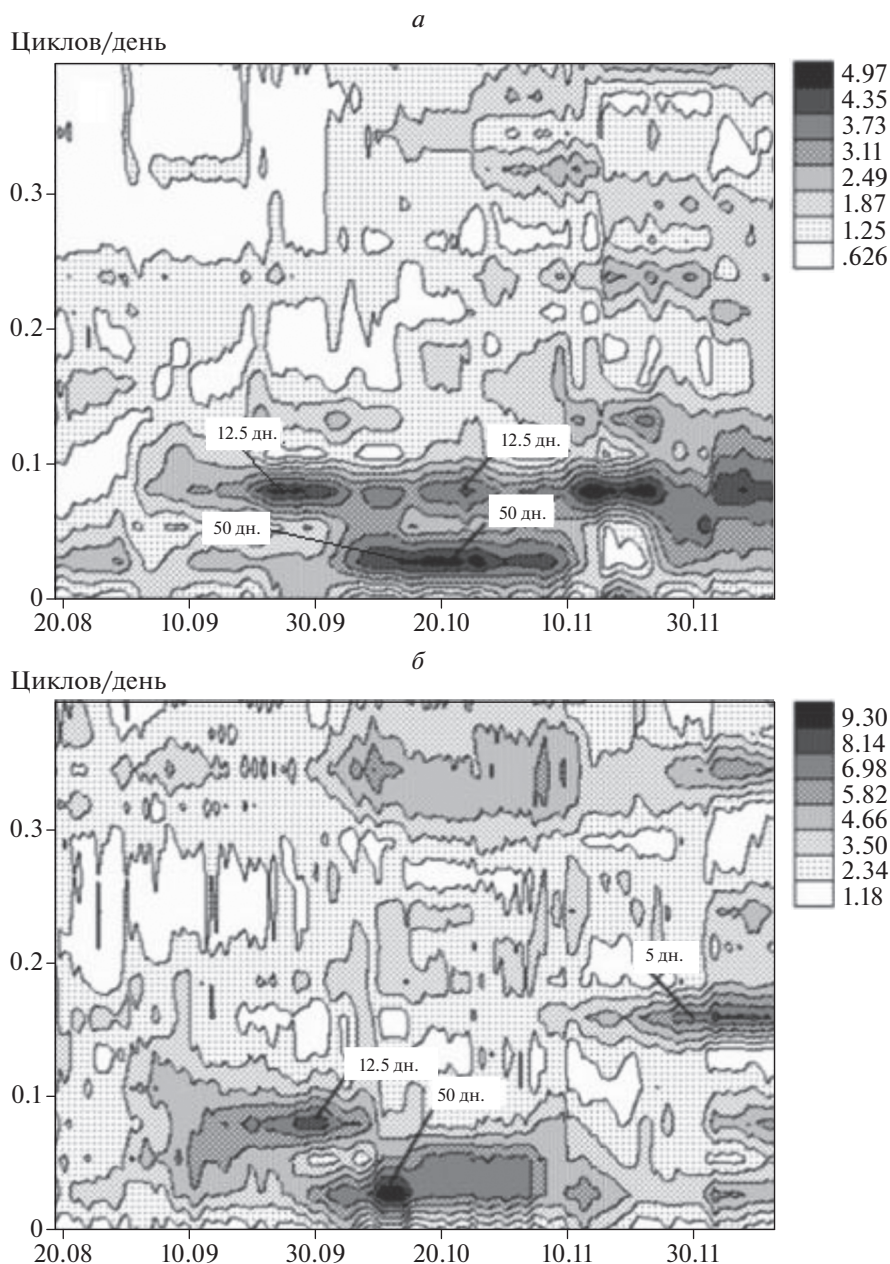


Рис. 4. СВД-диаграмма температуры (*a*) и влажности (*б*) для ГМС Горно-Алтайск.

существующую на данный момент периодичность температуры (это прослеживается по данным всех ГМС). Следует отметить, что долгосрочный негативный тренд температуры на рис. 3 связан с сезонным понижением температуры.

3.2. Динамика относительной влажности

В динамике относительной влажности по данным изучаемых ГМС выделяется 22.09.2003 г. (рис. 4*a*). Эта дата отмечается понижением значений относительной влажности, после чего следует повышение влажности. День землетрясения

приходится на повышение относительной влажности.

Коэффициенты корреляции между значениями относительной влажности за период времени с 01.08 по 31.12.2003 г. составили соответственно: Горно-Алтайск и Кош-Агач -0.002 , Кош-Агач и Усть-Кокса -0.09 , Горно-Алтайск и Усть-Кокса -0.60 , доверительная корреляция при уровне значимости $0.001 R_{\text{крит}} = 0.14$. Низкая степень связи между показателями относительной влажности изучаемых ГМС со ст. Кош-Агач (которая расположена вблизи эпицентральной зоны землетрясения) может быть связана с подготовкой Чуйского

землетрясения и активным протеканием афтершокового процесса.

Для сравнения приведем коэффициенты корреляции между значениями относительной влажности за аналогичный период времени 2002 г., которые составили соответственно: Горно-Алтайск и Кош-Агач -0.44 , Кош-Агач и Усть-Кокса -0.53 , Горно-Алтайск и Усть-Кокса -0.66 , доверительная корреляция при уровне значимости $0.001 R_{\text{крит}} = 0.14$.

Необходимо отметить, что по современным исследованиям в Чуйской степи, где находится ГМС Кош-Агач, отмечаются процессы аридизации климата, поэтому уровень корреляции характеристик относительной влажности этой ГМС с другими метеостанциями ниже [Sukhova et al., 2020].

Спектрально-временной анализ относительной влажности за данный период на данных ГМС выявил следующие особенности (рис. 4б). За данный период времени полностью не проявилась ни одна временная периодизация относительной влажности. До 30.08 по ГМС Кош-Агач проявляется периодичность в 5 сут, после — она исчезает. По ГМС Усть-Кокса эта периодичность проявляется после 10.10.2003 г. С 01.09.2003 г. появляется периодичность в 50 дней. Также отчетливо прослеживается прерывание периодичности в 12.5 сут в форшоковый период. В то же время необходимо отметить, что момент Чуйского землетрясения существенно изменил существующую на данный момент периодичность относительной влажности (наиболее четко это прослеживается по данным ГМС Горно-Алтайск).

3.3. Поправка атмосферного химического потенциала

На основании метеорологических характеристик ГМС Горного Алтая за период с 01.09.2003 г. по 31.12.2003 г. была рассчитана поправка атмосферного химического потенциала для ГМС Кош-Агач (отметим, что это самая близко расположенная ГМС к эпицентру Чуйского землетрясения — 30 км). При анализе было выявлено, что за несколько дней (с 25.09.2003 г.) до Чуйского землетрясения отмечается резкое увеличение величины поправки со средних значений 0.012 до 0.028 эВ. Это повышение отмечено 09.09 и 18.09.2003 г.

На основании данных поправки для ГМС Горно-Алтайск был построен график изменения поправки для данной ГМС (удаление от эпицентра 200 км) (рис. 5а).

Значения поправки атмосферного химического потенциала на данных ГМС (рис. 5а) практически в одно время изменяются перед Чуйским землетрясением, что свидетельствует о том, что изменение данной характеристики происходило

одновременно, т.е. данный эффект имел большую площадь проявления. В то же время, коэффициент корреляции поправки за период с 01.08 по 31.12.2003 г. между ГМС Кош-Агач и Горно-Алтайск -0.04 , между ГМС Кош-Агач и Усть-Кокса составляет -0.14 , между ГМС Усть-Кокса и Горно-Алтайск -0.68 , доверительная корреляция при уровне значимости $0.001 R_{\text{крит}} = 0.14$. Возможно, с афтершоковым облаком землетрясений, произошедших с сентября по декабрь 2003 г. в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения [Еманов и др., 2014] и связано снижение поправки атмосферного химического потенциала в период с 20.10 по 31.12.2003 г.

Спектрально-временной анализ поправки за данный период на данных ГМС выявил следующие особенности (рис. 5б).

За данный период времени полностью не проявилась ни одна временная периодизация поправки. В то же время необходимо отметить, что момент Чуйского землетрясения существенно изменил существующую на данный момент периодичность поправки (наиболее четко это прослеживается по данным ГМС Горно-Алтайск). Здесь отчетливо прослеживается периодичность в 50 сут, особенно по ГМС Кош-Агач. По другим ГМС проявляется периодичность в 12.5 сут. Также в это время на данной ГМС проявляются периодичности 5–6 сут. По данным ГМС Кош-Агач также прослеживается размывание периодизации значений поправки, до 30.08.2003 г. здесь проявляется периодичность в 5 сут, затем она исчезает.

3.4. Скрытая теплота испарения

Подготовка Чуйского землетрясения могла изменить в регионе характеристики скрытой теплоты испарения, в этот период выделяются отдельные пики данной характеристики, приходящиеся на 09–12.09.2003 и 25.09.2003 г., что может быть связано с форшоковым процессом. Отметим, что пики этой характеристики также отмечались по значениям поправки атмосферного химического потенциала (рис. 6а).

По всей видимости, Чуйское землетрясение и его афтершоковый процесс инициировали выделение в атмосферу большого количества энергии, что обусловило повышение скрытой теплоты испарения перед Чуйским землетрясением, во время основного толчка и при афтершоковом процессе. Кривая данной характеристики показывает резкое повышение скрытой теплоты испарения в период с 01.08.2003 г. до 31.12.2003 г. на территории всего Горного Алтая. Данная характеристика коррелирует с эффектом снижения сейсмичности на всей территории Алтае-Саянского региона в это время и активизации землетрясений только на территории Алтая. Необходимо отметить, что в

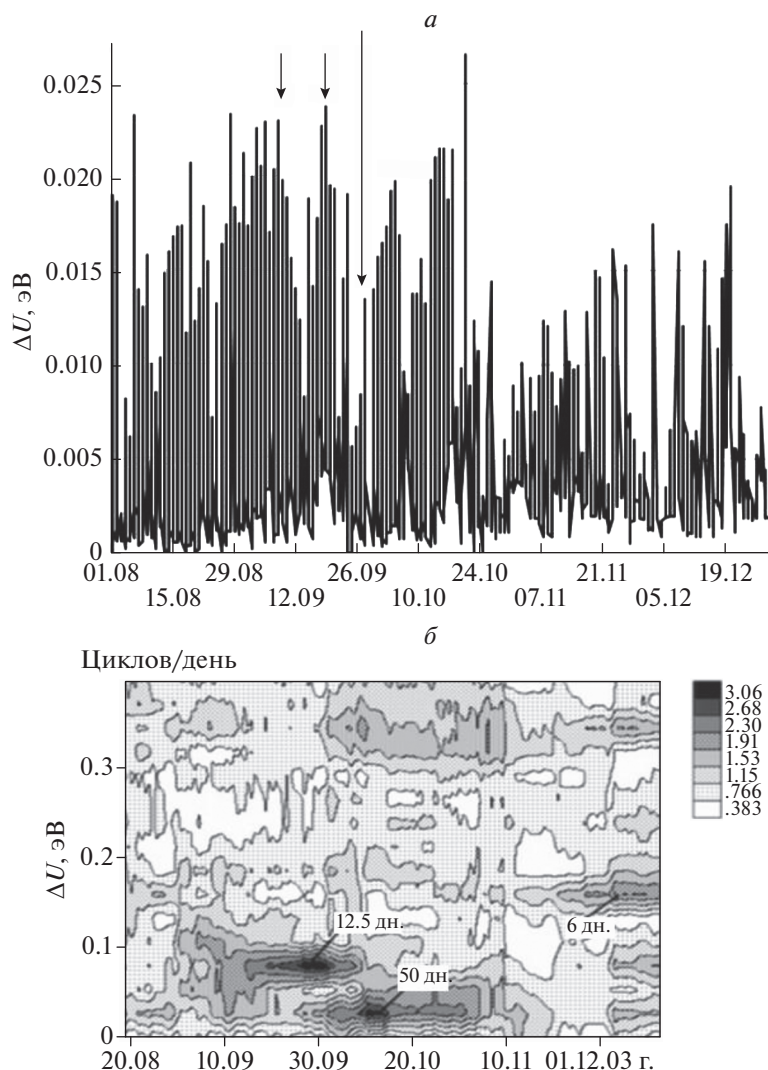


Рис. 5. Изменение поправки атмосферного химического потенциала для ГМС Горно-Алтайск (а) за период 01.08.2003 г. по 31.12.2003 г. и его СВАН-диаграмма (б). Длинная стрелка – момент Чуйского землетрясения, короткие стрелки – аномальное увеличение значений поправки 09.09.2003 г. и 18.09.2003 г., сразу после этих увеличений резко следует понижение значений поправки.

период с 2001 г. по 27.09.2003 г., т.е. до Чуйского землетрясения, регистрировались события, происходящие практически по всей площади Республики Алтай, занятой станциями, в то время как после землетрясения такая информация имеется только с ограниченной в пространстве области афтершоков [Еманов, 2004].

Спектрально-временной анализ скрытой теплоты испарения за данный период на данных ГМС выявил следующие особенности (рис. 6б). В форшоковый период не проявлена ни одна периодичность скрытой теплоты испарения. В то же время необходимо отметить, что после Чуйского землетрясения по всем ГМС отчетливо прослеживаются следующие периодичности: в 33, 10, 4 сут, что сви-

детельствует о влиянии афтершокового процесса на значения скрытой теплоты испарения.

3.5. Среднее и дисперсия поправки атмосферного химического потенциала

Расчет среднего и дисперсии, привязанных к середине периода, производился по семидневным значениям вычисляемых величин.

Анализ изменений этих статистических характеристик при подготовке, во время и афтершоковом процессе Чуйского землетрясения выявил следующие закономерности (рис. 7а). Дисперсия и среднее поправки атмосферного химического потенциала за период времени с 01.08.2003 г. по 31.12.2003 г. имеют высокую степень корреляции

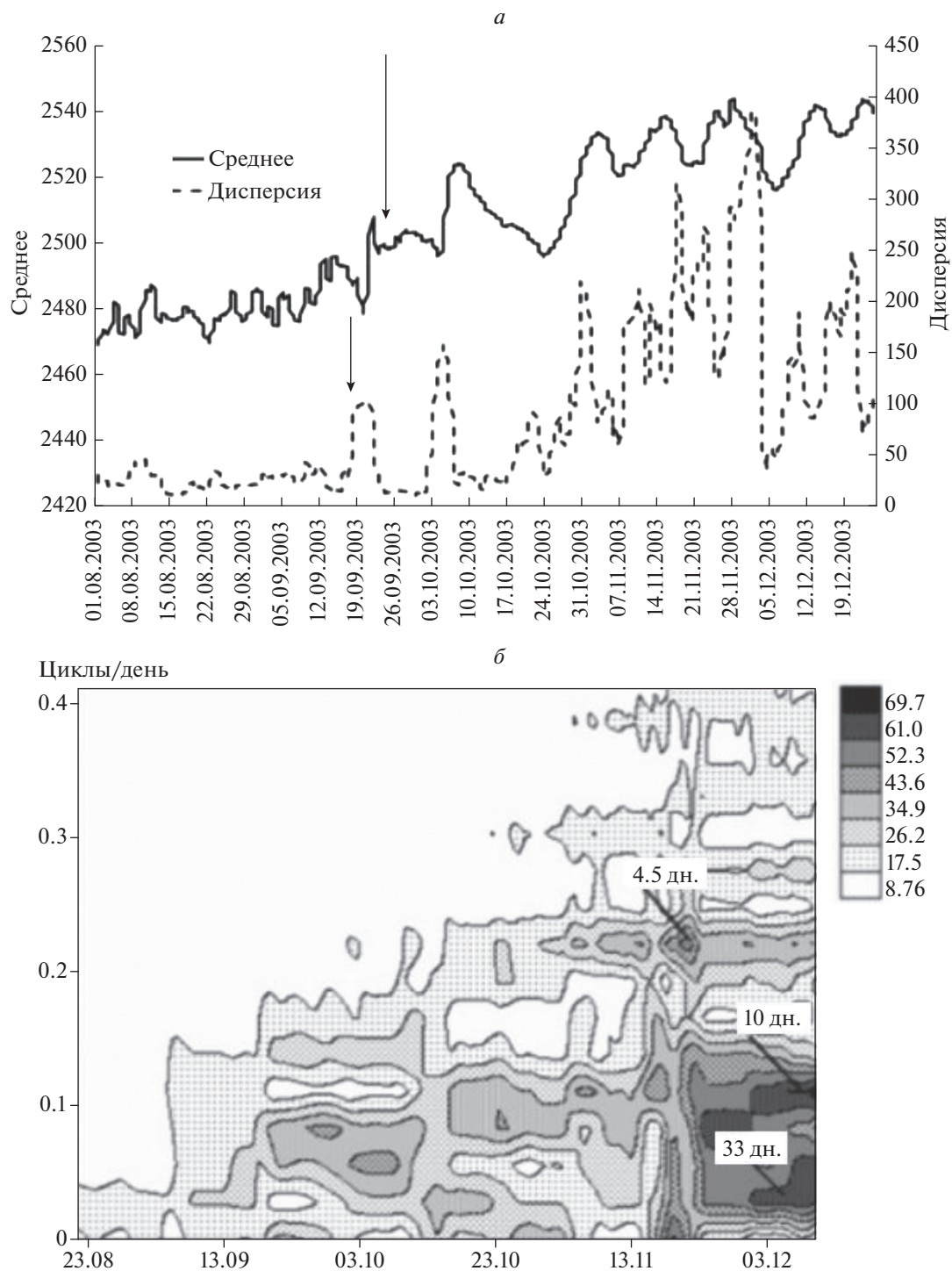


Рис. 6. Среднее и дисперсия скрытой теплоты испарения ГМС Горно-Алтайск (а) и его СВАН-диаграмма (б).

(до 0.8, доверительная корреляция при уровне значимости 0.001 $R_{\text{крит}} = 0.14$) между собой по всем наблюдаемым ГМС. В момент Чуйского землетрясения наблюдается понижение дисперсии и среднего по всем ГМС. В то же время, в форшоковый период по всем ГМС наблюдается резкое повышение

значений дисперсии и среднего поправки атмосферного химического потенциала: 20.08.2003 г. (только по ГМС, максимально приближенной к эпицентральной зоне), 04.09, 17.09.2003 г. После основного толчка наблюдается резкое снижение изучаемых статистических характеристик.

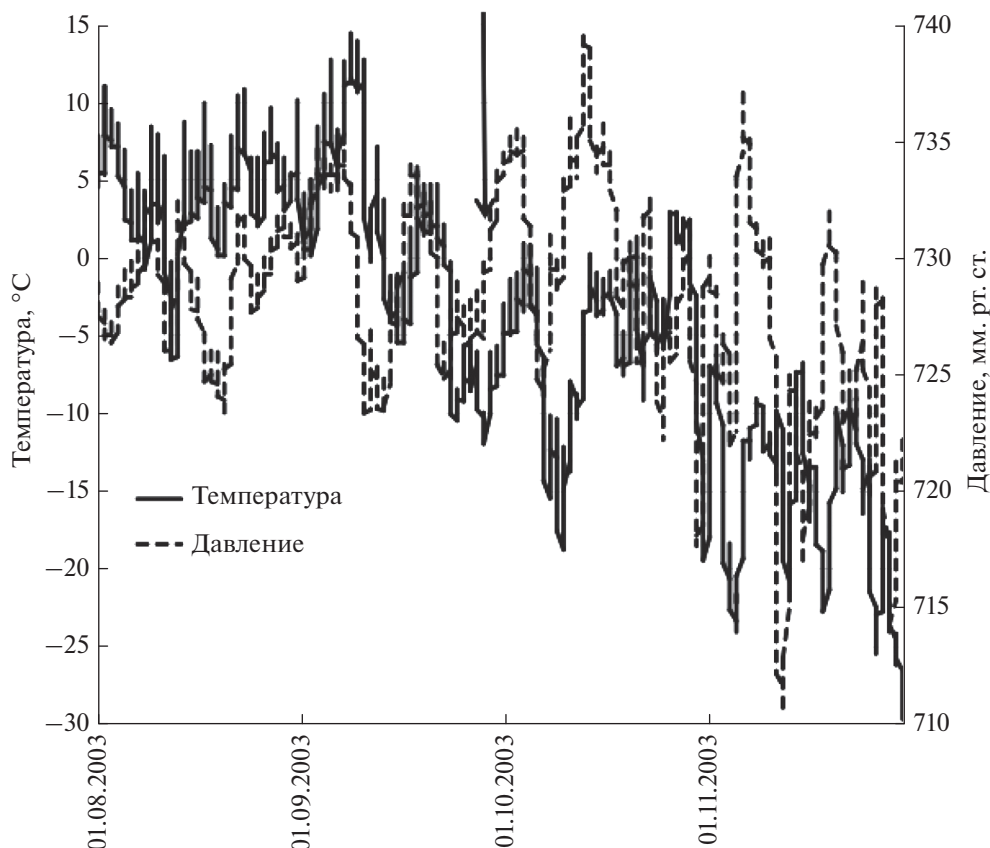


Рис. 7. Динамика температуры и давления в эпицентральной области Чуйского землетрясения.

Спектрально-временной анализ дисперсии поправки атмосферного химического потенциала за данный период на изучаемых ГМС выявил (рис. 7б) резкое изменение периодизации значений дисперсии поправки атмосферного химического потенциала с 01.10.03 г. Наиболее сильно это проявлено на ГМС Кош-Агач, что может быть связано с максимальной приближенностью данной метеостанции к эпицентральной зоне. С этого времени формируются новые периодичности по всем ГМС, но периодизации на каждой ГМС — различаются. Данный эффект свидетельствует о том, что данная характеристика на каждой ГМС проявлена по-разному.

3.6. Среднее и дисперсия скрытой теплоты испарения

В результате анализа дисперсии и среднего скрытой теплоты испарения были выявлены следующие закономерности (рис. 8а).

Наблюдается положительный тренд дисперсии и среднего скрытой теплоты испарения по всем наблюдаемым ГМС. Момент землетрясения характеризуется пониженным значением дисперсии. Кроме этого, наблюдается увеличение разброса дисперсии 12.09.2003 г., 19.09.2003 г., что

может свидетельствовать о резком всплеске данных значений в форшоковый период.

Спектрально-временной анализ дисперсии скрытой теплоты испарения за данный период на изучаемых ГМС выявил следующие особенности (рис. 8б). Фрагментарное проявление периодизации значений скрытой теплоты испарения. Первый период времени — с 25.08.2003 г. по 10.10.2003 г., здесь проявляется периодичность 12,5 дней, второй период времени — с 11.10.2003 г. по 17.11.2003 г., здесь проявляется периодичность 12,5 дней, третий период времени — с 18.11.2003 г. по 10.12.2003 г., здесь проявляются периодичности 33, 10 и 3 дня. Данный эффект свидетельствует о том, что выделение скрытой теплоты испарения определялось афтершоковым процессом Чуйского землетрясения.

4. ТЕМПЕРАТУРА, ДАВЛЕНИЕ, ПОПРАВКА АТМОСФЕРНОГО ХИМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ИСПАРЕНИЯ В ЭПИЦЕНТРЕ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

При изучении метеорологических данных, полученных в результате анализа атмосферных параметров в эпицентральной области Чуйского

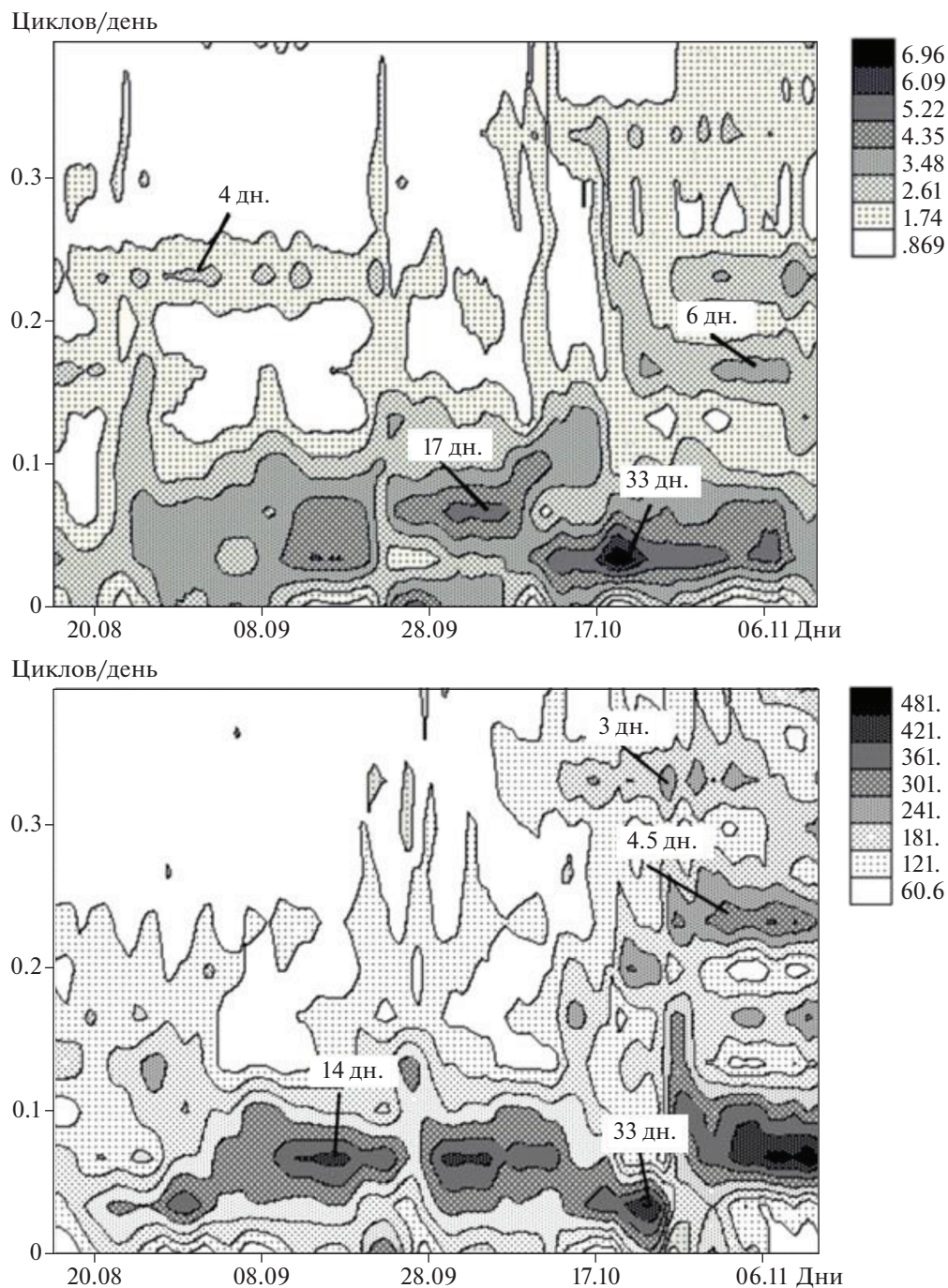


Рис. 8. СVAN-диаграмма температуры и давления в эпицентральной области Чуйского землетрясения.

землетрясения, было выявлено, что динамика температуры и давления на высоте 250 м (рис. 9) выделяется резким понижением температуры 22.09 и повышением — 06.09.2003 г. и 15.09.2003 г.

Наиболее показательно изменение изучаемых характеристик в результате афтершокового процесса Чуйского землетрясения можно проследить по СVAN-диаграммам (рис. 10, рис. 11).

По полученным СVAN-диаграммам изучаемый период времени можно разделить на следующие отрезки:

1. 01.08.2003—28.08.2003 г., здесь выделяются следующие периодичности: 4; 6 дней для скрытой теплоты испарения, для температуры, давления, АХП — периодичности размыты.
2. 30.08.2003—22.09.2003 г. выделяются периодичности: 14 дней (давление).

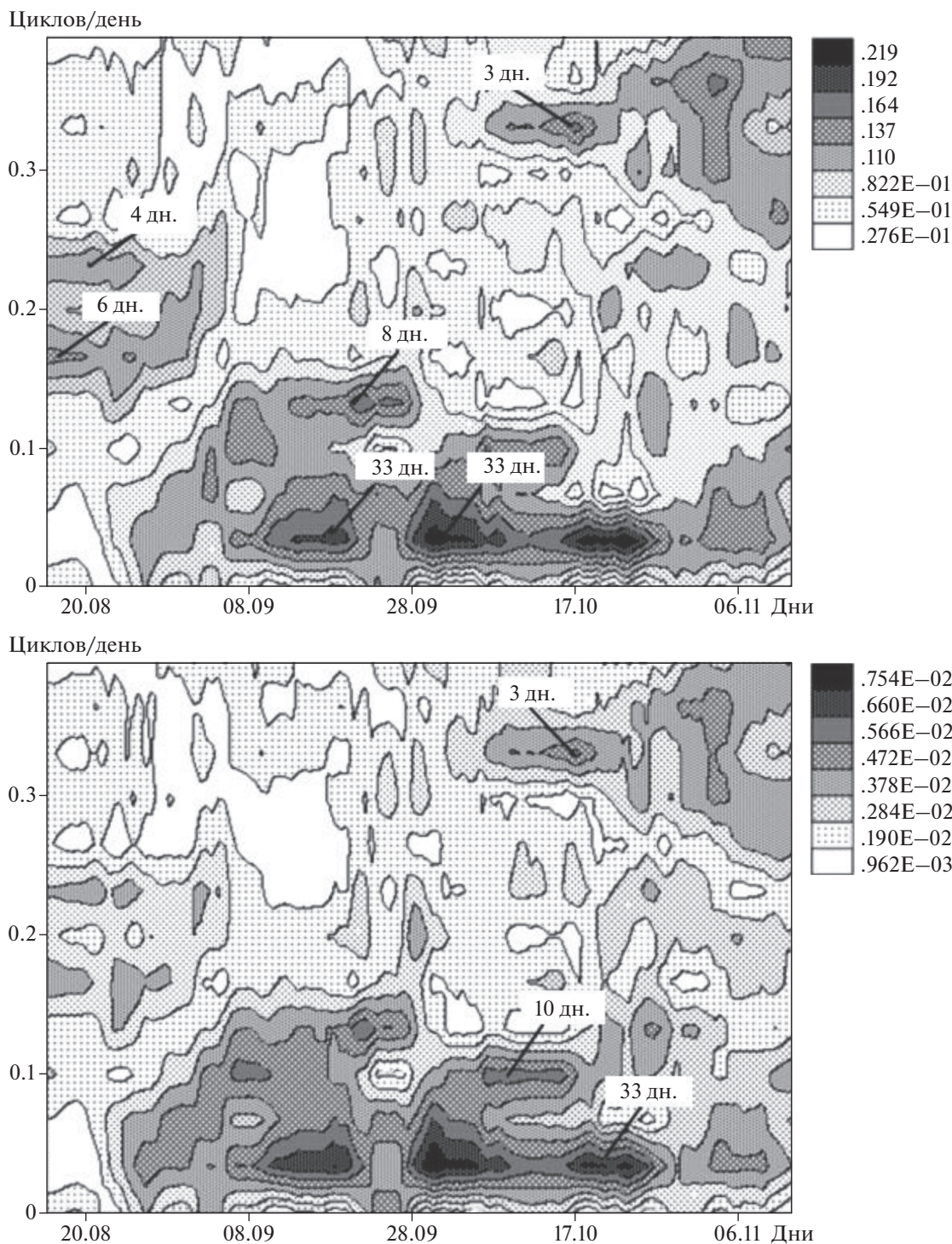


Рис. 9. СВАН-диаграмма скрытой теплоты испарения и атмосферного химического потенциала в эпицентральной области Чуйского землетрясения.

3. 06.09.2003–22.09.2003 г. выделяются периодичности 8, 33 дня (скрытая теплота испарения).

4. 30.09.–12.10.2003 г. выделяются периодичности 17 дней (температура), 33 дня (скрытая теплота испарения), 10, 33 дня (АХП).

5. 06.10.–21.10.2003 г. выделяются периодичности: 3 дня (скрытая теплота испарения, АХП).

6. 21.10.–31.12.2003 г. выделяются периодичности 6, 33 дня (температура), 3; 4.5; 14 дней (давление).

Таблица 1. Временная динамика изменения метеорологических характеристик в период Чуйского землетрясения и его афтершоков

Даты Чуйского землетрясения и его афтершоков*	Дата изменения периодичности	Характеристики, на которые оказало влияние землетрясение	Периодичности, которые проявляются после этого землетрясения
27.09	22.09–29.09	Температура, давление, СТИ, АХП	Размыты периодичности
01.10	30.09	Температура, давление, СТИ, АХП	Размыты периодичности
07.10	06.10	АХП, СТИ	8; 33 дня
15.10	13.10	АХП, СТИ	3; 10; 33 дня
22.10	23.10–31.11	АХП, СТИ	3; 10; 33 дня
17.11	10.11	Температура, давление, СТИ, АХП	Размываются периодичности

Примечание. * Данные по афтершоковому процессу взяты из статьи [Еманов и др., 2014].

В ряде случаев отрезки перекрываются, в них появляются новые периодичности, в связи с чем нами было проведено сравнение времени изменения периодичностей с сильными афтершоками (табл. 1).

В результате было выявлено, что практически после всех крупных афтершоков Чуйского землетрясения меняются периодичности изучаемых метеохарактеристик или происходит размывание существующих периодичностей.

Отдельно необходимо отметить, что выявленные изменения периодичностей перед Чуйским землетрясением, произошедшие 28.08.2003 г., 22.09.2003 г. могут относиться к краткосрочным предвестникам Чуйского землетрясения. Также в ряде случаев изменение периодичностей происходит до сильных афтершоков.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из современных представлений о сложности сейсмического очага крупного землетрясения [Рогожин, 2012], оно обычно происходит вблизи крупного тектонического разлома, как было выявлено на примере Чуйского землетрясения (2003 г.) [Еманов и др., 2017]. По всей видимости, накопления упругих напряжений на границах геологических блоков приводят к активизации процессов газовых эманаций [Войтов и др., 2000; Omori et al., 2007; Рудаков, 2009; Freund, 2009; Дода и др., 2013а, б]. Эти особенности способствуют изменению метеопараметров, и как следствие, генерации облачности над разломными зонами за несколько дней до землетрясения. Кроме того, указанные процессы участвуют в формировании грозных очагов спустя несколько дней после сейсмического события даже на уда-

лении от эпицентральной области. Вследствие конденсации влаги на ионах, формируемых в результате ионизации, уменьшается количество свободных молекул водяного пара в воздухе, что при достаточной интенсивности процесса регистрируется как уменьшение влажности. При этом установлено, что выделение энергии в атмосферу приводит к повышению температуры воздуха [Шитов, 2006].

Следует отметить, что поведение температуры, влажности и поправки химического потенциала в последние несколько дней перед землетрясением точно соответствуют таким же вариациям, регистрируемым перед сильными землетрясениями в разных регионах планеты [Pulinets and Ouzonov, 2018; Pulinets et al., 2006; Литвиненко и Литвиненко, 2023], что говорит о том, что обнаруженные вариации метеорологических параметров перед сильными землетрясениями отражают фундаментальный процесс поведения окружающей среды в преддверии сильных сейсмических событий.

6. ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что влияние изучаемых метеохарактеристик на значение поправки атмосферного химического потенциала сказывается следующим образом: экстремумы температуры отражаются на пиках поправки химического потенциала; общий тренд относительной влажности определяет ход кривой поправки. Температура, относительная влажность и поправка химического потенциала имеют разные периодичности, т.е. в период подготовки и в процессе сейсмического события отсутствуют четко выраженные периодичности метеохарактеристик.

2. Нами зафиксировано, что подготовка землетрясения отмечается повышением значений поправки атмосферного химического потенциала на изучаемых ГМС за несколько дней до землетрясения, сам момент землетрясения отмечается понижением значения поправки. Отмечено, что с расстоянием влияние подготовки, самого сейсмического события и его афтершокового процесса снижается или совсем исчезает. При этом обнаружено, что если землетрясение происходит вблизи от мест регистрации ГМС, то после него существенно изменяется периодизация поправки, резко уменьшается ее значение. Таким образом, изучение значений поправки атмосферного химического потенциала по сети ГМС в комплексе с другими характеристиками может выступать предвестником сейсмических событий.

3. Землетрясения происходят при понижении значений поправки атмосферного химического потенциала и скрытой теплоты испарения. Выявленные пики повышения значений данных характеристик, а также их дисперсии могут показывать время образования облачных структур над эпицентральной зоной готовящихся землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антикаева О.И., Шитов А.В. Результаты мониторинга метеопараметров на Горном Алтае до и после Чуйского землетрясения 2003 г. // Геофизические процессы и биосфера. Т. 13. № 1. С. 34–46. 2014.
- Арефьев С.С., Аптекман Ж.Я., Быкова В.В., Матвеев И.В., Михин А.Г., Молотков С.Г., Плетнёв К.Г., Погребченко В.В. Очаг и афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 года // Физика Земли. № 2. С. 85–96. 2006.
- Боярчук К.А., Карелин А.В., Надольский А.В. Статистический анализ зависимости поправки химического потенциала паров воды в атмосфере от удаленности эпицентра землетрясения // Вопросы электромеханики. Т. 116. С. 39–45. 2010.
- Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. М.: ВНИИЭМ. 203 с. 2006.
- Войтов Г.И., Гусев А.С., Козлова Н.С., Рудаков В.Р., Шулейкин В.Н. Эманационные и электрические эффекты над сложно построенными тектоническими структурами (на примере Александровской зоны приразломных поднятий, Белоруссия) // Докл. РАН. Т. 370. № 1. С. 105–108. 2000.
- Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой Центр данных. [Электронный ресурс]. Москва, 2023. Режим доступа: www.meteo.ru Дата обращения 12.01.2023.
- Гамбурцев А.Г., Александров С.И., Олейник О.В. и др. Комплексный экологический мониторинг и Атлас временных вариаций / Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. М.: Янус-К. С. 160–170. 2002.
- Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др. Чуйское землетрясение и его афтершоки // Докл. РАН. Т. 395. № 4. С. 1–4. 2004.
- Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Докл. РАН. Т. 405. № 6. С. 804–809. 2005.
- Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В., Чайка А.А. Космогеофизическая концепция прогноза землетрясений // Газовая и волновая динамика. Вып. 5. М.: Айрис-пресс. С.167–197. 2013а.
- Дода Л.Н., Степанов И.В., Натяганов В.Л. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений // Докл. РАН. Сер. Геофизика. Т. 453. № 5. С. 551–557. 2013б.
- Еманов А.Ф. Восстановление когерентных составляющих волновых полей в сейсмике. Автореф. дис. докт. техн. наук. Новосибирск: из-во ИНГГФ. 42 с. 2004.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (Горный Алтай) землетрясения // Геология и геофизика. Т. 46. № 10. С. 1065–1072. 2005.
- Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Колесников Ю.И. Мониторинг развития сейсмичности в эпицентральной области Чуйского землетрясения 27.09.2003 ($M_s = 7.3$, Горный Алтай) / Геофизические методы исследования земной коры. Материалы всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва (8–13 декабря 2014 г.). Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН. С. 134–137. 2014.
- Ландер А.В., Левшин А.Л., Писаренко В.Ф. О спектрально-временном анализе колебаний / Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных (Вычислительная сейсмология; вып. 6). М.: Наука. С. 336–349. 1975.
- Литвиненко В.В., Литвиненко Л.Н. Возможные триггеры землетрясений в Ташкенте, Спитаке, Измите и Гуджарате // Материалы XXXII заседания Всероссийского междисциплинарного семинара “Система планеты Земля”, Москва, МГУ. М.: Изд-во “Перо”. С. 156–166. 2023.
- Милькис М.Р. Метеорологические предвестники землетрясений // Физика Земли. № 3. С. 36–43. 1986.
- Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталёв В.Ю., Рыбин А.К., Баталёва Е.А. Система новейших разрывных нарушений Горного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика. Т. 49. № 6. С. 1139–1149. 2008.
- Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, стимулируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 4. С. 521–538. 2015.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. // Геотектоника. № 2. С. 3–23. 2007.
- Рогожин Е.А. Очерки региональной сеймотектоники. М.: ИФЗ РАН. 340 с. 2012.

- Рудаков В.П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир. 176 с. 2009.
- Шитов А.В. Изменение метеопараметров перед Чуйским землетрясением и здоровье населения Горного Алтая / V международный симпозиум “Контроль и реабилитация окружающей среды”: материалы докладов. Томск: изд-во ИМКЭС. С. 147–148. 2006.
- Aptikaeva O.I., Shitov A.V. Dynamics of radon activity due to earthquakes (by the example of Altai seismically active region) // *IZV ATMOS OCEAN PHY*, 52(8). 2016.
- Ariel R. *Cesped*. Analysis of psychometric parameters associated with seismic precursors in Central Chile: a new earthquake or the great 2010 Maule M8.8 aftershock? // *New Concepts in Global Tectonics J. V. 3. № 3. September 2015. P. 383–386. 2015.*
- Dey S., Singh R.P. Surface latent heat flux as an earthquake precursor // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 3. P. 749–755. 2003.*
- Freund F. Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals // *J. Atmos. Sol-Terr. Phy. № 71. P. 1824–1834. 2009.*
- Jing F., Shen X.H., Kang C.L., Xiong P. Variations of multi-parameter observations in atmosphere related to earthquake // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. № 13. P. 27–33. 2013.*
- Omori Y., Yasuoka Y., Nagahama H. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. № 7. P. 629–635. 2007.*
- Pulinets S.A., Ouzounov D., Ciraolo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajevska M., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Kotsarenko A., Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 // *Ann. Geophysicae. № 24. P. 835–849. 2006.*
- Pulinets S.A. The synergy of earthquake precursors. *Earthquake Science. № 24. P. 535–548. 2011.*
- Pulinets S., Ouzounov D. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model – an unified concept for earthquake precursors validation // *J. Atmos. Sol-Terr. Phy. № 41. P. 371–382. 2011.*
- Pulinets S., Ouzounov D. The possibility of earthquake forecasting. *Learning from Nature. Bristol: IOP Publishing. December 2018. 167 p. 2018. <https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1248-6>*
- Rogers R.R., Yau M.K. *A short course in Cloud Physics 3rd Edition. Oxford: Pergamon Press. 302 p. 1989.*
- Shitov A.V. Changes in the effect of geological factors on the health of the population during Geodynamical activation // *Izv. Atmos. Ocean Phy. V. 48. № 8. P. 859–870. 2012.*
- Sukhova M., Zhuravleva O., Karanin A., Kharlamova N. Climatic causes of dangerous hydrological phenomena in the Altai region // *Air Quality, Atmosphere and Health. V. 13. № 10. P. 1211–1222. 2020.*