НАУКА, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ КЫРГЫЗСТАНА, № 10, 2019

# Свердлик Л.Г.

# ТЯНЬ-ШАНДАГЫ СЕЙСМИКАЛЫК АКТИВДҮҮЛҮК УЧУРУНДА ТРОПОСФЕРАНЫН ЦИРКУЛЯЦИЯСЫН ИЗИЛДӨӨ

### Свердлик Л.Г.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ТЯНЬ-ШАНЕ

## L.G. Sverdlik

# STUDY OF UPPER TROPOSPHERE CIRCULATION DURING SEISMIC ACTIVITY IN THE TIAN SHAN

УДК: 551.513: 550.34

Магнитудасы М=7.3 болгон Суусамыр жер титирөөсүнүн (19-август 1992-жыл) эпицентралдык зонасынын үстүндөгү циркуляция процесстеринин өзгөрүү динамикасы изилденди. Сейсмикалык окуяга чейинки мезгил ичинде жогорку тропосферадагы шамал ылдамдыгынын талааларынын жана вариацияларынын мейкиндик-убакыттык бөлүштүрүлүшү каралды. Кошумча маалымат катары MERRA реанализинин жана HYSPLIT алыска ташылуу глобалдык моделинин маалыматтары колдонулду. Аба агымдарынын басымдуу бөлүгү түндүк-батыш жана түндүкө багытталганда, сейсмикалык процесстин активдүүлүгү катталганы көрсөтүлдү. Түндүк шамалынын компонентинин ылдамдыгы титирөөдөн бир күн мурун максималдуу көрсөткүчкө жеткен. Алынган жыйынтыктар, жогорку сейсмикалык активдүүлүк менен мүнөздөлгөн мезгилдердин пайда болушунда, тропосферанын циркуляциясынын аномалиялары белгилүү бир ролду ойношу мүмкүн деп божомолдоого негиз беришет. Бул, орографиялык ар кыл тектүүлүктөргө басым жана жаныма жүктөмдөрүнүн күчөп өзгөрүүсүнө байланыштуу болушу мүмкүн.

**Негизги сөздөр:** жер титирөө, моделдөө, кайтарым траектория, шамалдын ылдамдыгы, шамалдын багыты, меридионалдык ташуу, жогорку тропосфера.

Проанализирована динамика изменения циркуляционных процессов над очаговой зоной Суусамырского землетрясения магнитудой M=7.3 (19 августа 1992 года). Рассмотрено пространственно-временное распределение полей и вариаций скорости ветра в верхней тропосфере в период, предшествующий сейсмическому событию. В качестве исходной информации использовались данные глобальной модели дальнего переноса HYSPLIT и реанализа MERRA. Показано, что активизация сейсмического процесса регистрировалась в условиях преобладания северо-западного и северного направления воздушных потоков. Скорость северной компоненты ветра достигала максимальных значений за сутки до землетрясения. Полученные результаты дают основания полагать, что аномалии циркуляции тропосферы могут играть роль в возникновение периодов, характеризующихся повышенной сейсмической активностью. Это, вероятно, связано с изменением интенсивности барических и тангенциальных нагрузок на орографические неоднородности.

Ключевые слова: землетрясение, моделирование, обратные траектории, скорость ветра, направление ветра, меридиональный перенос, верхняя тропосфера.

Variation dynamics of circulation processes above the focal area of the Suusamyr earthquake of magnitude M=7.3 (August 19, 1992). Spatial-temporal distribution of wind field and variations in the upper troposphere during the period preceding the seismic event has been analyzed. Data of the HYSPLIT longrange transport global model and MERRA reanalysis were used as the initial information. It was demonstrated that seismic process activation was registered under conditions of domination of north-west and north directions of air streams. The speed of the northern wind component achieved maximum values a day before the earthquake. The results obtained allow to assume that troposphere circulation anomalies may be a contributor to emergence of processes characterized by increased seismic activity. It probably occurs due to change of intensity of baric and tangential loads on orographic inhomogeneities.

**Key words**: earthquake, simulation, backward trajectory, wind speed, wind direction, meridional transport, upper troposphere.

### Введение.

Прогресс последних десятилетий в развитии и совершенствовании систем и методов спутникового дистанционного зондирования способствовал получению доказательств того, что на последних этапах процесса подготовки сильных землетрясений может происходить непрерывный обмен энергией между литосферой и различными слоями атмосферы и ионосферы [1]. Определенную роль в сейсмическом процессе играют изменения уровня и периодичности солнечной активности, которые вызывают ряд сложных и взаимосвязанных явлений в геосферах, способствующих накоплению дополнительной энергии в земной коре [2, 3]. Выполненные ранее исследования взаимодействия атмосферы-литосферы позволили сделать вывод о связи глобальной и региональной сейсмической активности с вариациями суточного вращения Земли, которые в значительной степени обусловлены изменениями момента импульса зональной циркуляции [4, 5]. Влияние крупномасштабного перераспределения воздушных масс в атмосфере и локальной флуктуации ветров проявляется в механическом воздействии посредством трения воздуха о подстилающую поверхность и давления на орографические неоднородности [5, 6]. При этом взаимодействие ветра с орографией могут приводить к колебаниям вертикальных и тангенциальных напряжений в литосферных блоках [7]. Передача момента импульса между атмосферой и Землей происходит преимущественно в пограничном слое атмосферы из-за разницы давления на разные стороны горных хребтов [8] и может проявляться в районах активных разломов [5]. А значит изменения скорости и направления воздушных потоков в тропосфере могут играть важную роль в вариациях сейсмической активности и способны ускорить возникновение землетрясения, назревающего в земной коре независимо от атмосферных процессов [9].

В рамках данного исследования динамики изменения циркуляционных процессов над территорией Тянь-Шаня проанализированы аномальные проявления пространственно-временного изменения характеристик ветрового режима в верхней тропосфере над эпицентральной зоной крупнейшего за последние десятилетия Суусамырского землетрясения магнитудой M=7.3, произошедшего 19 августа 1992 г. в 02:04:36 UTC (42.07° с.ш., 73.63° в.д.).

#### Исходные модельные и сейсмические данные.

Анализ циркуляционных процессов в верхней тропосфере, которые предшествовали сильному землетрясению, основывался на результатах расчетов обратных траекторий движения воздушных масс. Моделирование траекторий продолжительностью 24 часа с шагом по времени 6 часов проводились с помощью программного комплекса NOAA HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [10]. Эта модель применима к объектам любого масштаба – от нескольких десятков метров до дальнего переноса. В качестве входных данных портала HYSPLIT Model использовались двухмерные и трехмерные поля температуры воздуха, давления, меридиональной и зональной скорости ветра, которые представлены в глобальной базе метеопараметров GDAS (Global Data

Assimilation System). Поскольку высота горных хребтов Северного Тянь-Шаня в среднем составляет 3.8-4.2 км, все оценки проводились в диапазоне высот от ~5.2 км (500 hPa) до ~16.0 км (100 hPa). Из всего объема процессов, определяющих циркуляцию атмосферы в исследуемом регионе, рассматривалось только адвективное перемещение воздушных масс [11].

Данные о пространственном распределении направления и скорости ветра (*Northward* и *Eastward*) на 9 вертикальных уровнях давления (500-100 *hPa*) получены в оперативном режиме на сайте *GMAO MERRA* [12]. Поля метеопараметров представлены на горизонтальной сетке  $0.5 \times 0.67^{\circ}$  с шагом измерений по времени  $\Delta t$ =3h.

Сейсмические данные получены с использованием цифровых записей сети KNET [13] и относятся к периоду с 01 июля по 30 сентября 1992 г., который включает пред- и пост сейсмические периоды Суусамырского землетрясения (K=17.0 или M=7.3). Для обеспечения однородности анализируемых данных каталог землетрясений был приведен к формату с равномерной дискретизацией по 3-х часовым интервалам.

#### Обработка модельных данных.

Выполненный ранее анализ обратных траекторий, основанный на данных моделирования [10], позволил выделить наиболее типичные направления переноса воздушных масс над территорией Северного Тянь-Шаня: юго-восточное (SE); юго-западное (SW); западное (W), северо-западное (NW) и северное (N)[11]. Достаточно стабильно в многолетних данных наблюдалось доминирование адвекции воздушных масс с юго-запада (SW), на долю которых приходилось от 35 до ~65 % [9]. Учитывая, что большая часть активных региональных разломов, как и слагающих Тянь-Шань горных хребтов вытянуты в широтном и субширотном направлениях, можно ожидать наиболее вероятного проявления согласованности межлу возникновением сильных землетрясений и типами циркуляции, при которых воздушные течения приобретают меридиональные (южные и, главным образом, северные) составляющие (SE, NW, N). Для этого производилось восстановление траекторий для каждых суток исследуемого периода.

Вместе с расчетами обратных траекторий воздушных потоков было проведено моделирование сложного рассеивания и перемещения частиц воздуха в пространстве и во времени. Используя возможности статистической обработки результатов, предоставляемые моделью *HYSPLIT*, выполнялось построение траекторий переноса воздушных масс в виде матричных, ансамблевых и частотных распределений для отдельных слоев верхней тропосферы и нижней стратосферы в интервале высот ~5.0-16.0 км.

Загруженные файлы модельных данных, содержащие значения скорости северного и восточного ветра, позволили сформировать временные серии и вертикальные профили параметров для дальнейшего анализа. Направление переноса ( $\Theta$ ) и модуль двумерного результирующего вектора ( $V_R$ ) в каждый момент времени определялись по значениям зональной ( $V_E$ ) и меридиональной ( $V_N$ ) составляющим скорости ветра:

$$\Theta = \operatorname{arctg} \frac{V_E}{V_N} V_R = \sqrt{V_E^2 + V_N^2}$$

Угол ( $\Theta$ ) указывает направление воздушного потока относительно истинного севера (0° или 360°) по часовой стрелке.

### Обсуждение результатов.

Результаты моделирования обратных траекторий объема воздуха перед приходом в заданную географическую точку, расположенную над эпицентром землетрясения магнитудой M=7.3, показаны на рисунке 1. Согласно этим данным, характерная особенность атмосферной циркуляции перед землетрясением проявлялась в устойчивом доминировании переноса воздушных масс с направления N, а траектории проходили над территориями Казахстана и России. На рисунке 1а показано распределение повторяемости 24-h обратных траекторий, проходящих практически над эпицентром землетрясения (42.00° N; 73.00° E) на высоте 6000 м (a.g.l.). Траектории вычислялись для каждых 6 часов в период с 17 августа (08:00 UTC) по 19 апреля (02:00 UTC) 1992 г. с последующим суммированием частот попадания в каждую ячейку сетки 1°×1° и нормированием на общее количество смоделированных траекторий.

# NOAA HYSPLIT MODEL



Рис. 1. Частотное распределение 24-h обратных траекторий, проходящих над эпицентром землетрясения (42.0° N; 73.0° E) на высоте 6000 м в период с 17 августа (08:00 UTC) по 19 августа (02:00 UTC) 1992 г. (а) и матрица 24-h обратных траекторий для высоты прибытия 8000 м (b).

## НАУКА, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ КЫРГЫЗСТАНА, № 10, 2019

На рисунке 1b показана матрица обратных траекторий, построенных при смещении начальной точки с равномерно распределенным шагом в пределах ±(1.0-1.5)° относительно координат эпицентра землетрясения. Представлены результаты вычислений для 12:00 *UTC* (18 августа) и высоты прибытия 8.0 км. Максимальная длина траекторий составляла ~2000 км, что свидетельствует о мощных воздушных течениях, направленных из высоких широт в низкие.

В подтверждение, на рисунке 2 приведена карта пространственного распределения северной компоненты скорости ветра на уровне 500 *hPa*. Как видно, область максимума усредненной за период времени с 00:00 по 05:00 (18 декабря) скорости ветра ( $V_N$ =24 m/s) на уровне 500 *hPa* располагалась на подступах к горным массивам северного Тянь-Шаня.



**Рис. 2.** Пространственное распределение северной компоненты скорости ветра на уровне 500 *hPa* с (00:00–05:00 *UTC*, 18 декабря 1992 г.



**Рис. 3.** Вертикальные профили северной компоненты скорости ветра 17-20 декабря (а); изменения северной и восточной компонент ветра (b), угла направления ветра и сейсмической активности (c) в декабре 1992 г.

### НАУКА, НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ КЫРГЫЗСТАНА, № 10, 2019

Вертикальные профили северной компоненты скорости ветра, построенные для периода 17-20 декабря (рис. 3а), позволили выделить области, в которых происходили наибольшие изменения  $V_N$  (350-400 hPa). На рисунке 3b приведены вариации северной и восточной компонент ветра на уровне 400 hPa. Совмещенные графики вариаций угла направления ветра ( $\Theta$ ) и последовательность энергетических классов землетрясений (K) в декабре 1992 г. показывают, что процесс смены доминирующего на протяжении месяца западно-восточного переноса воздушных масс ( $\Theta$ ~90°) и развитие меридиональной циркуляции ( $\Theta$ ~180°) предшествовало основному сейсмическому удару (рисунок 3с).

Учитывая, что повторяемость циркуляции с северными составляющими (*NW*+*N*) довольно невысока и варьирует в разные годы в пределах ~15-30% [11],

направления воздушных потоков вдоль меридиана с севера на юг, а также имеющие достаточно хорошо выраженную северную компоненту (225°≥Ю>135°). которые характеризуются высокими значениями скорости и могут приводить к увеличению ветровой нагрузки на горные хребты, можно рассматривать в качестве аномалий атмосферной циркуляции. Очевидно, что такая аномалия циркуляции атмосферы предшествовала началу периода сейсмической активности 19 августа 1992 г., как, впрочем, и большинству других проявлений сейсмичности в июле-августе 1992 г. (рис. 4а). Этот рисунок иллюстрирует данные, которые были восстановлены над участком (В), смещенным на 2° по направлению на север относительно эпицентра землетрясения, где расположены хребты Тянь-Шаня и наблюдались скорости северной компоненты ветра, близкие к максимальным (рис. 2).



**Рис. 4.** Вариации угла направления ветра и сейсмической активности в июле-августе 1992 г. (а); годограф изменчивости вектора скорости ветра на уровнях 400 *hPa* (b) и 150 *hPa* (c) в период 17-20 августа 1992 г.

Годограф, построенный на основе измеренных значений восточной (Eastward) и северной (Northward) компонент вектора скорости ветра на изобарических уровнях 400 *hPa* (рис. 4b) и 150 *hPa* (рис. 4c), дает представление об изменчивости скорости и направления воздушных потоков в каждый последовательный момент времени (*Дt*=3 часа) с 17 по 20 августа 1992 г. Как видно, моменту землетрясения магнитудой М=7.3 (отмечен красным маркером) предшествовал ветер, имеющий сильную северную меридиональную составляющую. На более близком к земной поверхности уровне 400 *hPa* наблюдалось запаздывание (примерно на сутки) землетрясения относительно момента максимума скорости северной компоненты ветра.

### Заключение.

При исследовании сильных геофизических возмущений, в частности крупных сейсмических событий, важную роль играет численное моделирование циркуляции атмосферы и спутниковые измерения ветрового режима. На основе использования данных моделирования было установлено, что за сутки до Суусамырского землетрясения 19 августа 1992 г. над территорией Северного Тянь-Шаня доминировал меридиональный тип циркуляции и хорошо выраженный северный перенос воздуха со средней скоростью ~24 m/s. Согласованность между возникновением сильного землетрясения магнитудой М=7.3 и меридиональными атмосферными процессами северного направления дает основания полагать, что циркуляция атмосферы может играть определенную роль в возникновение периодов, характеризующихся повышенной сейсмической активностью, вследствие изменения интенсивности вертикальных и тангенциальных нагрузок, в первую очередь, на орографические неоднородности земной поверхности. Полученные результаты являются предварительными и, очевидно, требуется более детальное исследование динамики верхней тропосферы и нижней стратосферы с привлечением данных за другие периоды времени. Это позволит лучше понять механизма формирования возмущений температуры в области тропопаузы и получить дополнительную информацию о взаимосвязи тепловых аномалий с процессами подготовки крупных землетрясений.

Автор благодарен сотрудникам Лаборатории ARL NOAA за возможность использования модели HYSPLIT. А также руководителям и сотрудникам NASA GES-DISC, обслуживающим систему Giovanni.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции РАН в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9).

### Литература:

- 1. De Santis A., De Franceschi G., Spogli L., Perrone L., Alfonsi L., Qamili E., Cianchini G., Di Giovambattista R., Salvi S., Filippi E., Pavon-Carrasco F.J., Monna S., Piscini A., Battiston R., Vitale V., Picozza P.G., Conti L., Parrot M., Pinçon J.-L., Balasis G., Tavani M., Argan A., Piano G., Rainone M.L., Liu W., Tao D. Geospace perturbations induced by the Earth: the state of the art and future trends. J. Phys. Chem. Earth. 2015. 85-86. P. 17-33.
- 2. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1987. - 98 с.
- 3. Боков В.Н. Возможности метеорологии в управлении сейсмическими рисками. РГГМУ. Ученые записки. №55. - 2019. - C. 160-174.
- 4. Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли. // ДАН. Геофизика. 1994. т. 338. №4. - С. 525-527.
- 5. Дмитроца А.И., Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А. О влиянии астрономических факторов на динамику литосферных плит // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 2007. - 103. - №1. - С. 115–124. 6. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение
- Земли. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 366 с.
- 7. Кочеткова О.С., Михалев А.В., Мордвинов В.И., Татарников А.В. Динамика атмосферы и сейсмическая активность в Байкальской рифтовой зоне. Солнечно-земная физика. 2015. - Т. 1. - №3. С. 55-61.
- 8. Wilhelm S., Stober G., Matthias V., Jacobi Ch., Murphy D.J. Connection between the length of day and wind measurements in the mesosphere and lower thermosphere at midand high latitudes. Ann. Geophys. 2019. 37. - P. 1-14.
- 9. Свердлик Л.Г. Динамика верхней тропосферы и сейсмическая активность в Северном Тянь-Шане. / Журнал «Наука, новые технологии и инновации». - 2019. - №10.
- 10. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT Model access via NOAA ARL READY Website (http://www.arl.noaa. gov/HYSPLIT.php), NOAA Air Resources Laboratory. College Park. MD. 2013.
- 11. Sverdlik L.G., Chen B.B., Balin Y.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoilova S.V. Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 20, Atmospheric Physics. 2014. - C. 92923J.
- 12. GMAO MERRA. URL: http://gmao.gsfc.nasa.gov/merra
- 13. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и НС РАН в г. Бишкеке.
- 14. URL to Reproduce Results: http://giovanni.gsfc.nasa.gov/.