

ФИЗИКА ИЛИМДЕРИ
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ
PHYSICAL SCIENCES

Свердлик Л.Г.

**ТҮНДҮК ТЯНЬ-ШАНДАГЫ ҮСТҮҢКУ ТРОПОСФЕРАНЫН
ДИНАМИКАСЫ ЖАНА СЕЙСМИКАЛЫК АКТИВДҮҮЛҮГҮ**

Свердлик Л.Г.

**ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЫ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ
АКТИВНОСТЬ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ**

L.G. Sverdlik

**UPPER TROPOSPHERE DYNAMICS AND SEISMIC
ACTIVITY IN THE NORTH TIEN SHAN**

УДК: 551.513: 550.34

Түндүк Тянь-Шань территориясынын үстүнөн типтүү аба массаларынын алмашуу багыты кайтарып траекториялар ыкмасы аркылуу изилденген. Тоолуу рельефтин татаал түзүлүшүн эске алып, 500 hPa изобаралык басым бетинде үстүңкү тропосферадагы атмосфералык процесстердин динамикасын баалоо иши жүргүзүлдү. Атмосферанын циркуляциясын моделдөө натыйжалары, шамал ылдамдыгынын түндүк жана чыгыш компоненттерин спутник аркылуу өлчөө маалыматтары менен толукталып, сейсмикалык активдүүлүк вариациялары менен салыштырылган. Жер титирөөлөр боюнча алгачкы маалыматтар катары KNET сейсмикалык тармагынын санарип жазуулары алынды. $K > 9.0$ энергетикалык класс-тагы жер титирөөлөр саны менен түндүк түзүүчүсү бар кайтарып траекторияларынын кайталануусу ортосунда туруктуу байланыш табылды. Жүргүзүлгөн изилдөө, атмосферадагы циркуляция процесстери, мүмкүн сейсмикалык окуялардын демилгелөөсүндө белгилүү бир ролду ойнооруна негиз берет.

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

Типичные направления переноса воздушных масс над территорией Северного Тянь-Шаня исследовались с использованием метода обратных траекторий. Учитывая сложное строение горного рельефа, производилась оценка динамики атмосферных процессов в верхней тропосфере на изобарической поверхности 500 hPa. Результаты моделирования циркуляции атмосферы, дополненные данными спутниковых измерений северной и восточной компонент вектора скорости ветра, были сопоставлены с вариациями сейсмической активности. Исходными данными о произошедших землетрясениях послужили цифровые записи сейсмической сети KNET. Установлена хорошо выраженная связь между количеством землетрясений энергетического класса $K > 9.0$ и повторяемостью траекторий, имеющих северную меридиональную составляющую. Проведенное исследование дает основание полагать, что циркуляционные процессы в атмосфере, вероятно, могут играть определенную роль в инициировании сейсмических событий.

Ключевые слова: землетрясение, обратные траектории, скорость ветра, направление ветра, спутниковые данные, меридиональный перенос.

Typical directions of the transfer of air masses over the territory of the Northern Tien Shan were studied using the method of reverse trajectories. Given the complex structure of the mountainous terrain, the dynamics of atmospheric processes in the upper troposphere on an isobaric surface of 500 hPa was estimated. The results of modeling atmospheric circulation, supplemented by satellite measurements of the northern and eastern components of the wind velocity vector, were compared with variations in seismic activity. The initial data on the earthquakes occurred were digital records of the KNET seismic network. A well-defined relationship was found between the number of energy-class earthquakes $K > 9.0$ and the frequency of occurrence of trajectories with a northern component. The study suggests that circulation in the atmosphere is likely to play a role in triggering seismic events.

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

Введение. В последние годы с развитием методов дистанционного зондирования появляется все больше доказательств того, что на последних этапах процесса подготовки сильных землетрясений может происходить обмен энергией между литосферой и различными слоями атмосферы и ионосферы [1]. Определенную роль в сейсмическом процессе играют изменения уровня солнечной активности, которые вызывают ряд взаимосвязанных явлений в геосферах, в том числе изменчивость циркуляции атмосферы, способствуя накоплению дополнительной энергии в земной коре [2, 3]. Перемещение областей высокого и низкого атмосферного давления может рассматриваться в качестве тектонического фактора, обуславливающего процессы накопления деформаций и напряжений, а значит способного ускорить возникновение землетрясения, назревающего в земной коре независимо от атмосферных процессов [4]. С целью изучения внутригодовой изменчивости атмосферных процессов, как одного из факторов, которые могут инициировать землетрясения, в данной работе рассмотрена динамика верхней тропосферы и сейсмической активности в Северном Тянь-Шане. Из всего объема процессов, определяющих циркуляцию атмосферы в конкретном регионе, были выделены только те, которые связаны с горизонтальной адвекцией воздушных масс.

Модельные, спутниковые и сейсмические данные. Анализ циркуляционных процессов в атмосфере основывался на результатах построения обратных траекторий движения воздушных масс. Расчеты траекторий продолжительностью 96 часов с шагом по времени 12 часов проводились с помощью модели дальнего переноса *HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)* [5]. В качестве входных данных этого программного комплекса использовались двухмерные и трехмерные поля давления, температуры воздуха, зональной и меридиональной скорости ветра, представленные в глобальной базе метеопараметров *GDAS (Global Data Assimilation System)*.

Сопоставление динамики атмосферных процессов с количеством землетрясений энергетического класса $K > 9.0$, произошедших на территории Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань) проводилось с использованием цифровых записей сейсмической сети *KNET* [6]. Так как средняя высота горных хребтов Северного Тянь-Шаня составляет 3.8-4.2 км, все оценки проводились по обратным траекториям, рассчитанным на изобарической поверхности 500 hPa (~5.2 км). На более низких уровнях существенное влияние имеет сложный рельеф поверхности, что приводит к значительным отклонениям расчетных значений от фактических параметров ветра [7]. На высотах более 5.0 км влияние этого фактора ослабевает.

Обсуждение результатов. Результаты проведенного для нескольких лет (2008-2013 гг.) моделирования обратных траекторий позволили выделить основные направления переноса воздушных масс: юго-восточное (SE); юго-западное (SW); западное (W), северо-западное (NW) и северное (N) [8, 9]. Многолетние распределения повторяемости траекторий (рис. 1а) показали достаточно стабильное доминирующее воздействие адвекции воздушных масс с юго-запада (SW), на долю которых приходилось от 35 до ~55%.

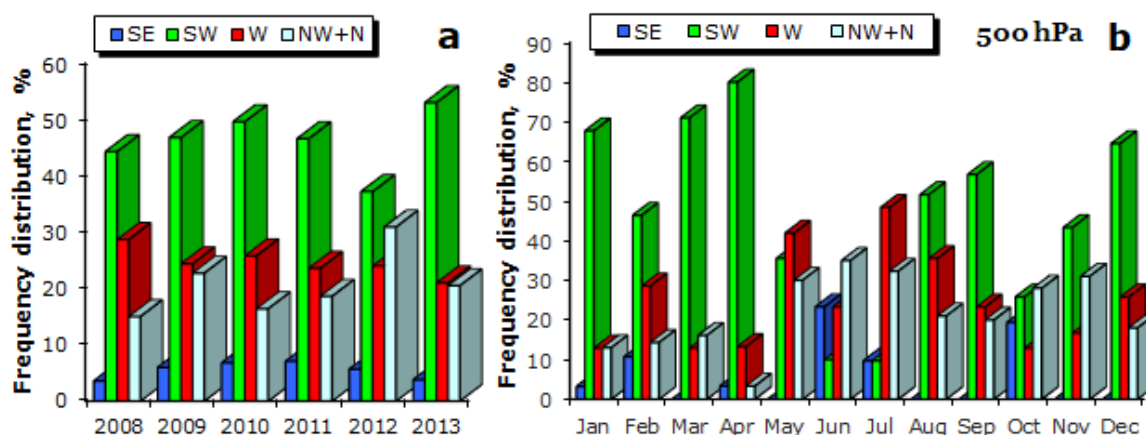


Рис. 1. Распределения повторяемости обратных траекторий (в %) по направлениям на изобарическом уровне 500 hPa: (а) – в период 2008-2013 гг.; (б) – в 2009 г.

Повторяемость меридионального типа циркуляции с северными составляющими ($NW+N$), которые переносят более холодный воздух и сопровождаются усилением вертикальных потоков [7], варьировала в пределах ~15-30%. Внутригодовое распределение повторяемости обратных траекторий по направлениям рассмотрено на примере данных 2009 года (рис. 1b).

Связь между атмосферными и сейсмическими процессами определялась путем сопоставления усредненной за каждый месяц повторяемости обратных траекторий и количеством зарегистрированных в Северном Тянь-Шане землетрясений. Наибольший коэффициент корреляции между этими временными рядами, составляющий $R=0.7$, был получен для обратных траекторий, в которых был хорошо выражен перенос воздушной массы с северо-западного (NW) и северного (N) направления (рис. 2). Это свидетельствует о высокой степени согласованности между возникновением относительно сильных землетрясений и меридиональными атмосферными процессами, что соответствует данным, приведенным в работе [3].

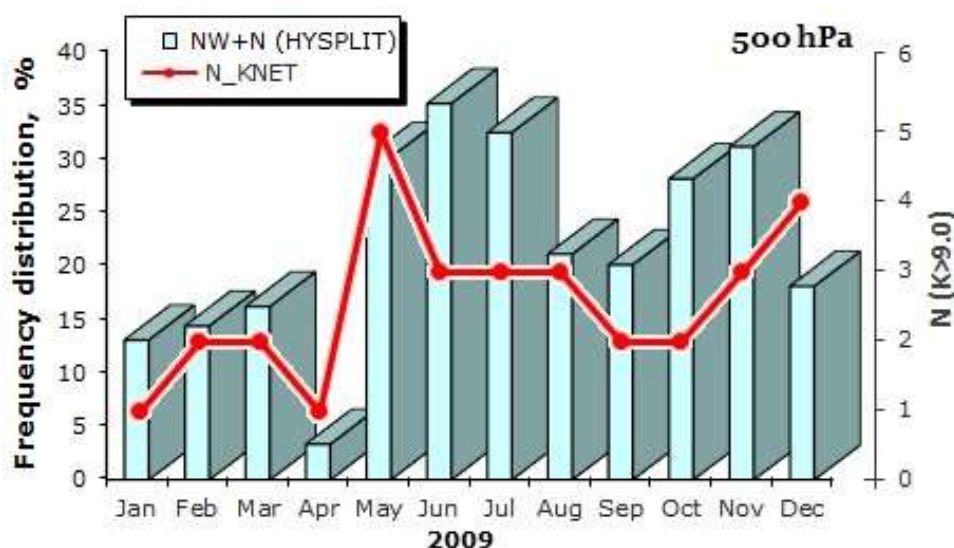


Рис. 2. Распределения повторяемости обратных траекторий (в %) с северного, северо-западного (NW) направления на уровне 500 hPa (а) и количество землетрясений энергетического класса $K>9.0$ (b) по данным сейсмологической сети $KNET$ в 2009 г.

На примере мощного взрыва в районе Токтогульского водохранилища (Камбарата) и последовавшего за ним землетрясения магнитудой $M=4.0$ (22 декабря 2009 г. в 06:54 UTC) проведена оценка пространственно-временной изменчивости циркуляции атмосферы. Анализ вертикального распределения характеристик тропосферного ветра проводился по данным спутникового дистанционного зондирования на различных уровнях верхней тропосферы [10] над местом проведения промышленного взрыва и эпицентром землетрясения (рис. 3а). Годограф, заданный изменениями северной (*Northward*) и восточной (*Eastward*) компонент вектора скорости ветра на изобарическом уровне 350 hPa, дает наглядное представление об изменениях направлений переноса воздушных потоков в каждый последовательный момент времени ($\Delta t=3$ часа) с 21 по 23 декабря 2009 г. (рис. 3б). Как видно, в период прохождения рассматриваемого землетрясения (22 декабря 2009 г.) преобладал ветер, имеющий сильную северную меридиональную составляющую.

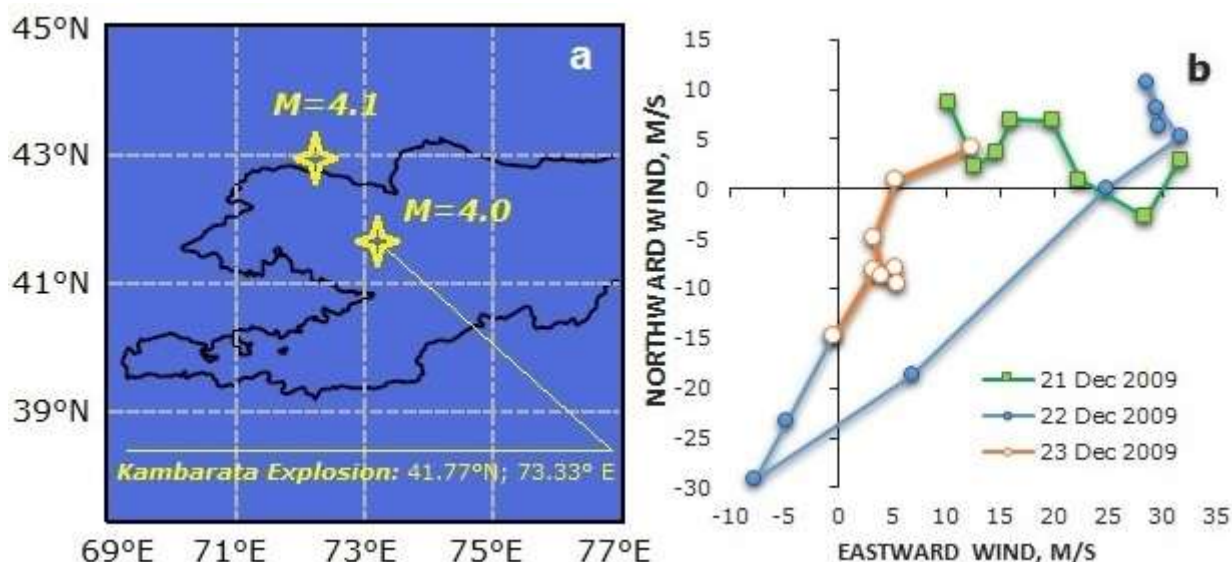


Рис. 3. Расположение эпицентров землетрясений (а) и годограф изменчивости северной и восточной компонент вектора скорости ветра на уровне 350 hPa (b).

Характерная особенность *атмосферной циркуляции* в период прохождения сильного сейсмического события магнитудой $M=5.4$, которое было зарегистрировано 27 апреля 2009 г. в 20:04:22 UTC на границе Кыргызстана и Казахстана (рис. 4), также проявлялась в преобладании переноса воздушных масс с направлений NW и N. На рисунке 4а показано распределение повторяемости 24-х обратных траекторий, проходящих над эпицентром землетрясения (43° N; 72.5° E) на высоте 5200 м (a.g.l.). Траектории вычислялись для каждых 6 часов в период с 27 апреля (05:00 UTC) по 28 апреля (23:00 UTC) 2009 г. с последующим суммированием частот попадания в каждую ячейку сетки $1^\circ \times 1^\circ$ и нормированием на общее количество смоделированных траекторий. Максимум скорости северной составляющей меридиональных потоков (~ 17 m/s) на уровне 500 hPa располагался рядом с эпицентром землетрясения (рис. 4б).

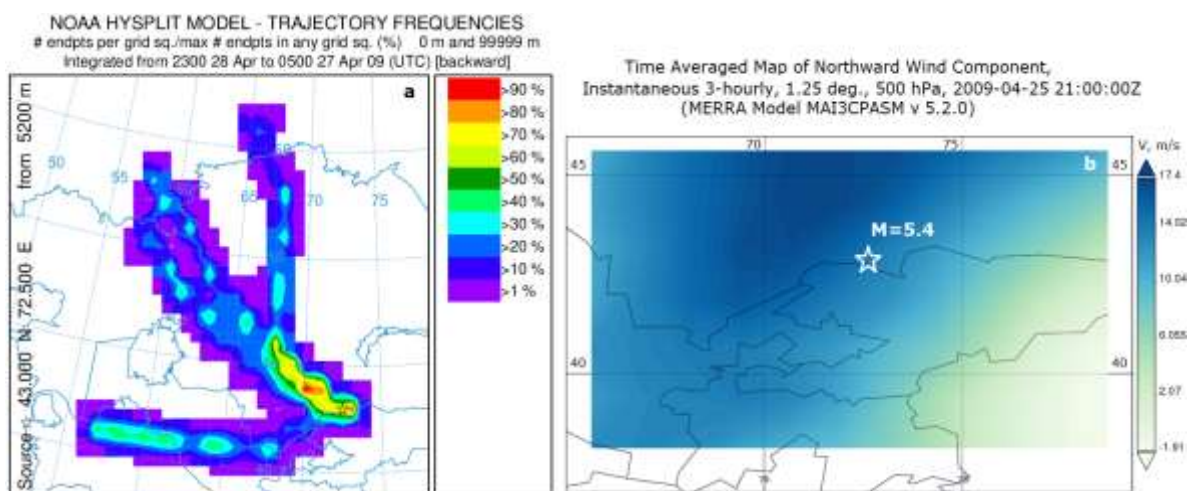


Рис. 4. Частотное распределение 24-х обратных траекторий, проходящих над эпицентром землетрясения (43° N; 72.5° E) на высоте 5200 м в период с 27 апреля (05:00 UTC) по 28 апреля (23:00 UTC) 2009 г. (а) и пространственное распределение северной компоненты скорости ветра (б).

Заключение. Проанализированы вариации сейсмичности на территории Бишкекского геодинамического полигона в сопоставлении с данными моделирования движения воздушных масс и спутниковыми измерениями скорости ветра. Установлена хорошо выраженная внутригодовая связь между количеством землетрясений энергетического класса $K > 9.0$ и повторяемостью траекторий, имеющих северную меридиональную составляющую. Несмотря на то, что представленные результаты, вероятно, не в полной мере отражают изменения в различных частях исследуемого региона, в тоже время они дают основания полагать, что циркуляционные процессы в атмосфере могут играть определенную роль в инициировании сейсмических событий. Представленные результаты являются предварительными и, очевидно, требуется более детальное исследование динамики верхней тропосферы, в первую очередь, с привлечением и сопоставлением данных за другие периоды времени.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № AAAA-A19-119020190064-9).

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. Гидрометеониздат. 1987. 98 с.
3. Боков В.Н. Межгодовая изменчивость сейсмичности и атмосферной циркуляции. РГТМУ. Ученые записки. №6. 2008. - С.39-147.
4. Адушкин 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.
5. 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.
6. Каталог землетрясений института сейсмологии НАН КР и ИС РАН в г. Бишкеке.
7. Зыскова Э.Ю., Свердлик Л.Г. Дальний тропосферный перенос аэрозоля. Вестник КРСУ. Т.4. - 2004. - №6. - С. 96-103.
8. Sverdlik L.G., B.B. Chen, Y.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner, S.V. Samoilova. 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. С. 92923J.
9. Свердлик Л.Г. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над Северным Тянь-Шанем. Наука, новые технологии и инновации. - 2016. №3. - С. 3-9.
10. URL to Reproduce Results: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/>.