

УДК 551.52 (575.2) (04)

**РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС АЭРОЗОЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
НАД ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИЕЙ****Э.Ю. Зыскова** – ведущий инженер**Б.Б. Чен** – докт. физ.- мат. наук

Classification of main direct transport of aerosols from different sources of contamination was carried out and the most probable direct and back trajectories of aerosol transport in border layer were calculated.

Ситуация, сложившаяся в регионе в связи с экологической трагедией Аральского моря под влиянием хозяйственной деятельности человека, увеличила число источников эмиссии аэрозолей в атмосферу, повысила ее общую загрязненность. Высохшая часть моря стала основным очагом выноса пыли и соли на территорию, прилегающую к зоне бассейна Аральского моря. Мелкодисперсные частицы аэрозолей могут распространяться на многие тысячи километров, увеличивая загрязнение атмосферы над обширными регионами. Нарушен был естественный цикл аэрозолей в атмосфере региона, включающий процессы эмиссии аэрозолей в атмосферу от природных источников, их переноса, трансформации и осаждения.

Для изучения переноса аэрозоля различными воздушными массами (ВМ) над Центральной Азией в турбулентном пограничном слое целесообразно рассматривать траектории на уровне 700 гПа, так как большая часть территории приподнята над уровнем моря на 500–1500 м, а в горном массиве – на 3000–3500 м и выше.

Типизация обратных (ОТ) и прямых (ПТ) траекторий перемещения воздушных масс на АТ-700 гПа идентична типизации на АТ-500 гПа, которая была проведена ранее для Центральноазиатского региона*. Сохранены и вре-

менные интервалы: обратные траектории рассчитывались на 4 суток назад (4D), прямые – на 2 суток вперед.

1. Типы обратных траекторий в зависимости от источника аэрозольного загрязнения приведены в табл. 1 и рис. 1. Как видно, тип I по классификации ОТ на АТ-500 гПа в [1] отсутствует. К этому типу относятся, в соответствии с [1], траектории ВМ с Северной Африки, а на АТ-700 гПа скорости перемещения значительно меньше, чем на АТ-500 гПа, и такой большой путь за 4 суток воздушная масса преодолеть не может. В типизации ОТ на АТ-700 гПа добавились три типа, не наблюдавшихся на АТ-500 гПа или входящих в другие типы с более длинными траекториями, а именно: юго-западные горные массивы Центральной Азии (тип VII), горные массивы Монголии и юга Сибири (тип VIII) и Тянь-Шань (тип IX). Это объясняется тем, что чем ближе к поверхности земли, тем больше сказывается влияние подстилающей поверхности, следовательно, уменьшается скорость перемещения воздушных масс. На направление траекторий также могут оказывать влияние орографические особенности горного рельефа и циркуляция в барических системах пограничного слоя атмосферы.

Как видно из рис. 2, чаще всего на Тянь-Шань ВМ поступает с северо-востока Казахстана – в 23% случаев (тип IV) и юго-западных центральноазиатских горных массивов – в

* Zyskova E.Y. Long-distance transport of aerosol / In: Chen B.B., Sverdlik L.G., Kozlov P.V. Optic and microphysics of atmospheric aerosol. – Bishkek, 2004. – Ch. 5. – P. 157–179

Таблица 1

Типы обратных траекторий в зависимости от источника аэрозоля

Типы обратных траекторий	Источник аэрозольного загрязнения
II	Ближний Восток (пустыни Аравии, Иранского нагорья, Афганистана)
III	Поволжье, Западный Казахстан (степи, полупустыни, пустыни, Прикаспийская низменность, плато Устюрт, Приаралье)
IV	Северо-восточный Казахстан (Казахский мелкосопочник, пустыни Прибалхашья, Бетпак-Дала, Мойынкум)
V	Средняя Азия (пустыни Каракумы, Кызылкум)
VI	Юго-восточные горные массивы Центральной Азии (Тибет, Гималаи), пустыни Такла-Макан, Тар
VII	Юго-западные горные массивы Центральной Азии (Алай, Памир, Гиндукуш, Карако-рум)
VIII	Горные массивы юга Сибири, Монголии (Алтай, Саяны)
IX	Тянь-Шань

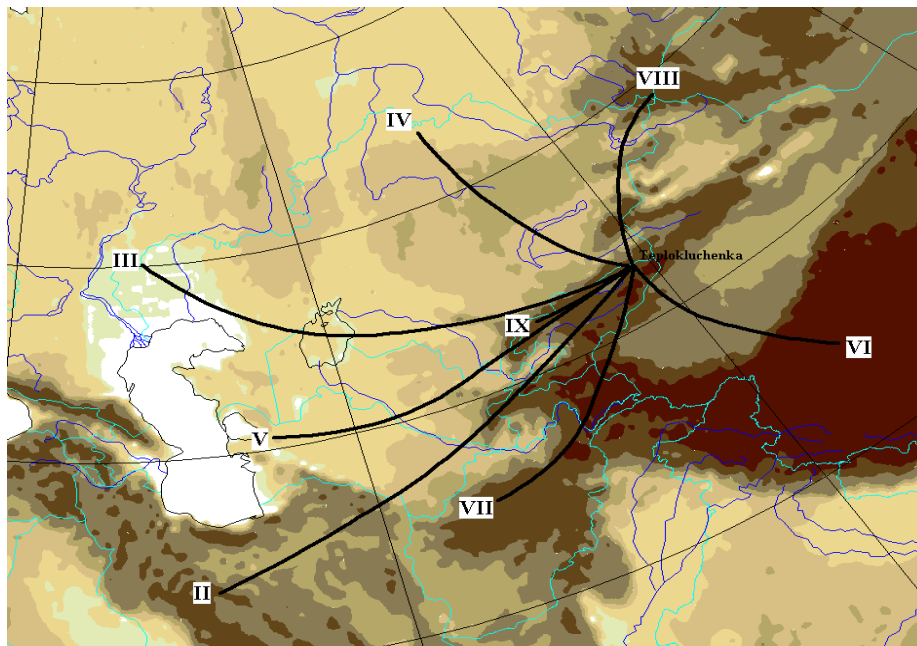


Рис.1. Типы обратных траекторий перемещения воздушных масс на АТ-700 гПа в зависимости от источника загрязнения.

19% случаев (тип VII). Нередки траектории с Поволжья (тип III) и пустынь Средней Азии (тип V). Их повторяемость составляет по 15%. Реже всего приходит воздушная масса с Ближнего Востока (тип II) – 9% и еще реже с Монголии и юга Сибири (тип VIII) – 2%.

В зимний период за счет частого появления над Центральноазиатским регионом вы-

сотной фронтальной зоны и развитой меридиональности процессов с выходом южных циклонов велика повторяемость переноса воздушных масс южных и юго-западных направлений. Так, траектории типов II, V, VII в сумме составляют 61,1% случаев (рис.2).

Весной над регионом обостряется циклоническая деятельность и происходит частая

смена процессов. Поэтому траектории перемещения воздуха имеют различные направления и протяженности. Наиболее часто ВМ приходит к Тянь-Шаню с северных – 20,7% (тип IV) и южных – 20,0% (тип V) пустынь Средней Азии, а также с юго-западных горных массивов – 18,7% (тип VII) (рис.2).

Летом (рис.2) в связи с подтоком с северо-запада холодного воздуха в тылу высотной ложбины значительно преобладает повторяемость траекторий типа IV – 38,2%. Нередки траектории с запада – 17,7% (тип III) и юго-запада – 11,8% (тип V).

В осенний период происходит смена летнего типа циркуляции на зимний, в связи с чем траектории воздушных масс, как и весной, часто меняют направление.

Суммарный вклад в пылесолеперенос на ледники Тянь-Шаня с бассейна Аральского моря (ОТ типов III, V) оценивается в 30,4%. Перенос ВМ, загрязненных аэрозолем преимущественно антропогенного характера с Южной Азии траекторий (ОТ типов VI, VII), осуществляется в 25% случаях, 23% траекторий приходит с аэрозолем горнорудных и угледобывающих месторождений Казахстана (ОТ типа IV).

2. Типизация прямых траекторий проведена по конечному пункту перемещения воздушного потока от Тянь-Шаня за 2 суток вперед (табл. 2, рис. 3), а не по названию, как это было принято при работе с траекториями на геопотенциальном уровне 500 гПа.

В результате проведенной типизация ПТ удалось выявить преобладающие направления дальнейшего перемещения ВМ с территории Тянь-Шаня (рис. 4). Из рис. 4 видно, что наиболее часто (40,4%) ВМ от Тянь-Шаня перемещаются через пустыню Такла-Макан на Тибет (тип 5), т.е. аэрозоль, прошедший над Тянь-Шанем, можно обнаружить и на Тибете. Довольно часто скорость перемещения настолько мала, что поток дальше самого Тянь-Шаня не смещается. Такая ситуация характерна для типа 3 (26,9%). В очень редких случаях воздух уходит на север, в Казахстан – 2,5% и на юго-западные массивы Центральной Азии – 1,2%. Причем по сезонам распределение траекторий существенно отличается от среднегодовых значений. Так, в зимний сезон чаще всего дальнейший путь воздушной массы лежит на северо-восток – на Алтай, Саяны; весной и осенью – на юго-восток через пустыню Такла-Макан; летом скорости потока невелики, воздух кружится над Тянь-Шанем или медленно смещается на юго-восток, при этом большая часть аэрозоля оседает на ледники Тянь-Шаня.

3. Вероятности переходов обратных траекторий в прямые приведены на рис. 5. Установлено, что преобладающее большинство обратных траекторий всех типов ВМ в году продолжали путь от Тянь-Шаня в юго-восточном направлении (ПТ типа 5). Незначительное количество траекторий было направлено на север (ПТ типа 1) и юго-запад (ПТ типа 6).

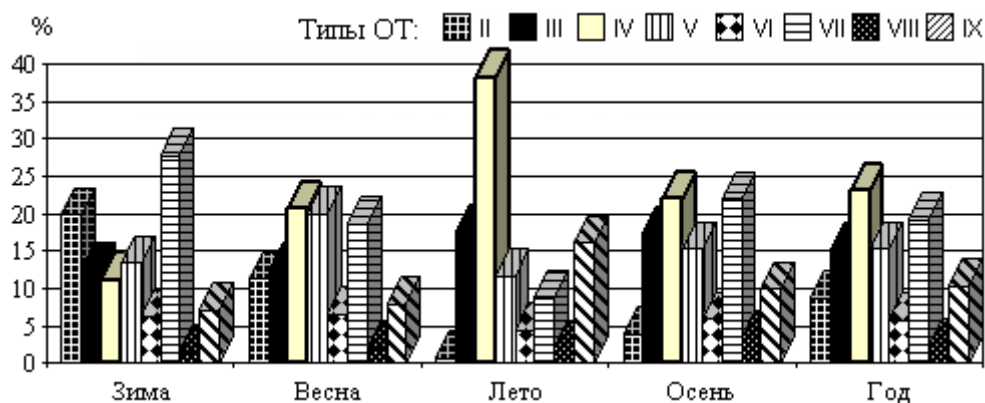


Рис. 2. Повторяемость типов обратных траекторий (%) по сезонам и за год.

Таблица 2

Типы прямых траекторий

Типы прямых траекторий	Направление траекторий
I	Степи и пустыни Казахстана (Казахский мелкосопочник, пустыни Прибалхашья, Бетпак-Дала, Мойынкум)
II	Горные массивы юга Сибири, Монголии (Алтай, Саяны), пустыни на северо-западе Китая
III	Тянь-Шань
IV	Пустыни северного Китая и юга Монголии (Гоби, Алашань)
V	Пустыня Такла-Макан, Тибет, Гималаи
VI	Юго-западные горные массивы Центральной Азии (Алай, Памир, Гиндукуш, Каракорум), пустыня Тар

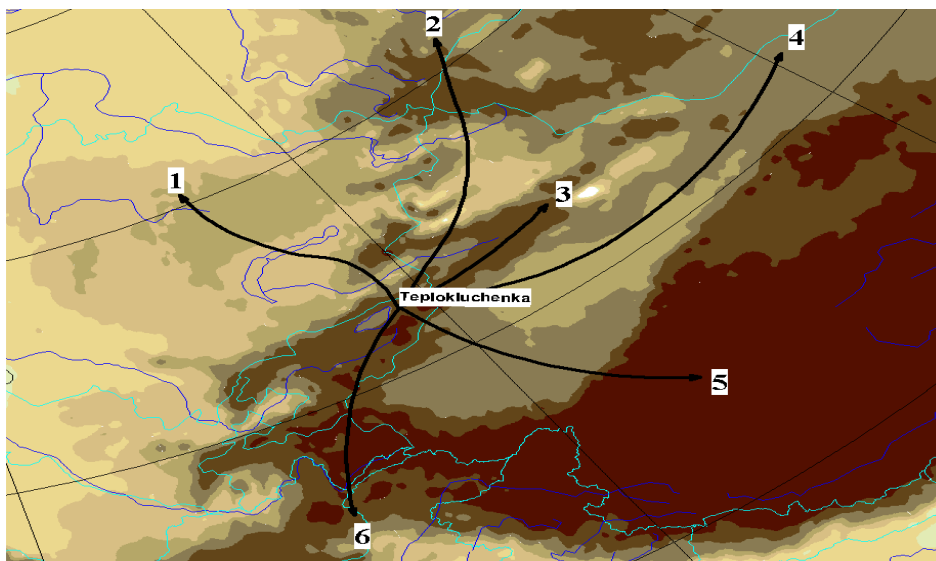


Рис. 3. Типы прямых траекторий перемещения воздушных масс на АТ-700 гПа

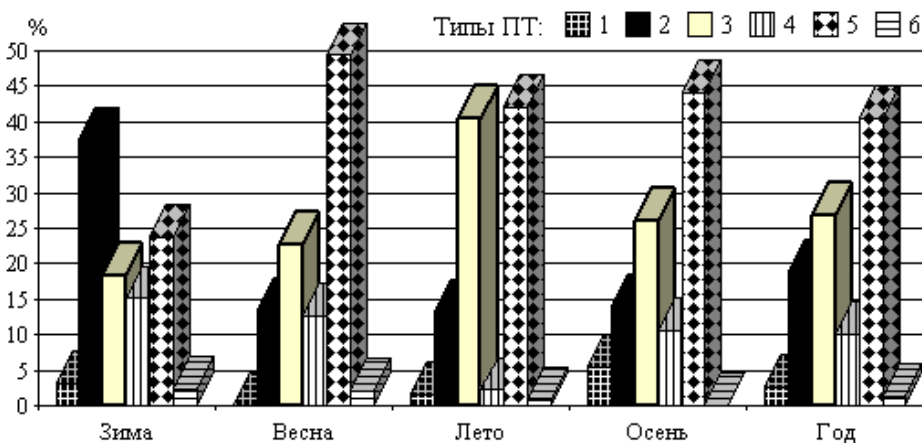


Рис. 4. Повторяемость типов прямых траекторий (%) по сезонам и за год.

Чаще всего наблюдался переход ОТ типа IV в ПТ типа 5, что составляет 11,9% от числа всех переходов (рис. 5). Довольно часто в тип 5 ПТ переходят ОТ типа V (6,0%) и типа VII (7,5%). Редко повторяющиеся типы обратных траекторий, как правило, переходят лишь в некоторые типы прямых траекторий. Например, ОТ типа VIII переходят только в ПТ типов 3, 4, 5.

В зависимости от сезона повторяемости переходов обратных траекторий в прямые имеют существенные различия как по числу случаев, так и по процентному соотношению. Это обусловлено различной сезонной повторяемостью циркуляционных и синоптических процессов в атмосфере, а также орографическими особенностями данного региона.

Рассмотрим вероятности основных переходов обратных траекторий по источникам загрязнения в прямые по сезонам (рис. 6–9).

Зимой (рис. 6) перенос ВМ с юга и юго-запада (ОТ типа II, V, VII) от Тянь-Шаня далее осуществляется в разных направлениях. Чаще всего это происходит на Алтай, Саяны (ПТ типа 2) – 35–60%, Такла-Макан, Тибет (ПТ типа 5) – 20–30% или на горные хребты Восточного Тянь-Шаня (ПТ типа 3) – 12–23%. Западные траектории (ОТ типа III) в 38–44% случаев могут переходить в прямые траектории восточного и северо-восточного направлений типов 2 и 4. С Северного Казахстана (ОТ типа IV) воздух перемещается в большинстве случаев на Такла-Макан (36%) и далее или пустыни Монголии и Северного Китая (21%). Редко поступающий на Тянь-Шань воздух с пустыни Такла-Макан (ОТ типа VI – 6%) в 63% случаев смещается на юг Сибири (ПТ типа 2).

Весной (рис. 7) воздух чаще всего смещается по обратным траекториям типа IV – 20,7% (Северо-Восточный Казахстан), типа V – 20,0% (Средняя Азия) и типа VII – 18,7% (юго-западные горные массивы Центральной Азии). Дальнейший путь воздушных масс по этим траекториям (рис. 7) лежит преимущественно над пустыней Такла-Макан к Тибету (34–68%). Нередко повторяющиеся ОТ типов II и III (11–13%) продолжают свой путь в том же направлении (от Тянь-Шаня по прямым траекториям типа 5 (42–59%)).

Летом (рис. 8) преобладающий перенос воздуха по обратным траекториям с территории Казахстана типа IV (38,2%) продолжается по ПТ типа 5 в 40,4%, типа 3 в 34,6%, типа 2 в 21,2% случаев. В два раза реже поток направляется по ОТ типа III (Поволжье, Устюрт) и далее преимущественно по ПТ типа 3 и 5. Смещение высотной фронтальной зоны в летний период к северу от рассматриваемой территории обуславливает малые скорости перемещения воздуха. Поэтому увеличивается количество переходов с короткими типами траекторий. Например, повторяемость ОТ типа IX над Тянь-Шанем летом увеличивается по сравнению с остальными сезонами в 2 раза, а вероятность перехода в прямые траектории над этим горным массивом составляет 63,6% случаев. Значительно уменьшается повторяемость ОТ типа VII (юго-западные центральноазиатские горы), что также связано с ослаблением циклонической деятельности в этот период. Очень редко (0,7%) летом ВМ с Ближнего Востока (ОТ типа II) практически всегда продолжают свой путь на северо-запад Китая и в Монголию (ПТ типа 2).

Осенью (рис. 9) вероятность основных переходов воздуха по ОТ типа IV (Северный Казахстан) и ОТ типа VII (юго-запад Центральноазиатского горного массива) в ПТ типа 5 (Такла-Макан, Тибет) составляет 60,6 и 42,4% соответственно. Траектории воздуха с юга и юго-востока (ОТ типа VI) в 66,7% случаев задерживают свое движение над Тянь-Шанем, а западные и юго-западные траектории (ОТ типа II, III, V) могут продолжать свой путь как в юго-восточном, так и в восточном и северо-восточном направлениях.

При перемещении ВМ в зависимости от рельефа и подстилающей поверхности на отдельных участках траектории может происходить подъем или опускание (осаждение) аэрозольных частиц. Рассмотрим более подробно, какими процессами сопровождается тот или иной переход. На всех вышеприведенных рисунках участки траекторий, где происходит подъем частиц аэрозоля, выделены пунктирными кривыми, а участки с нисходящими движениями – сплошными.

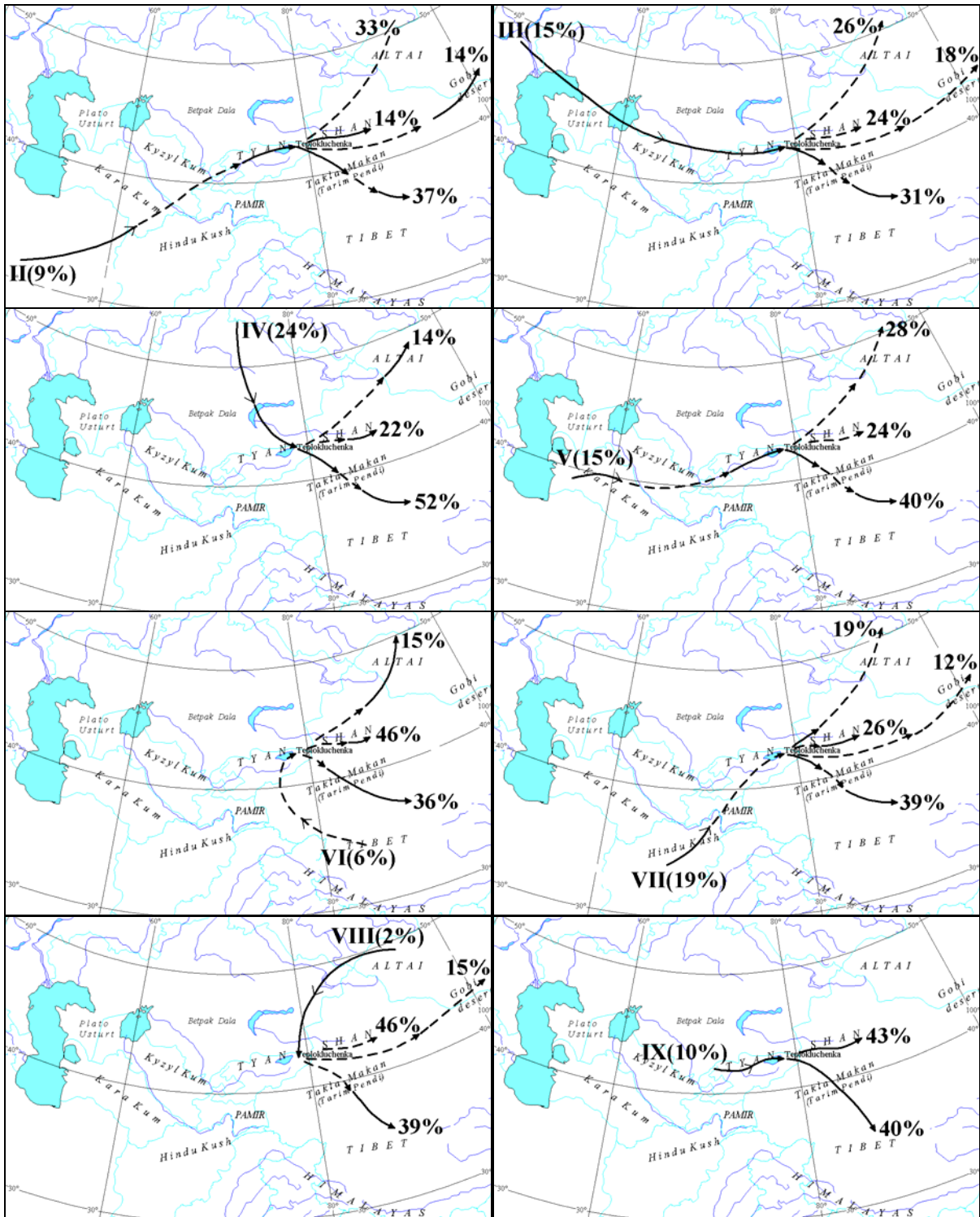


Рис. 5. Вероятности основных переходов обратных траекторий в зависимости от источника аэрозоля в прямые в течение года.

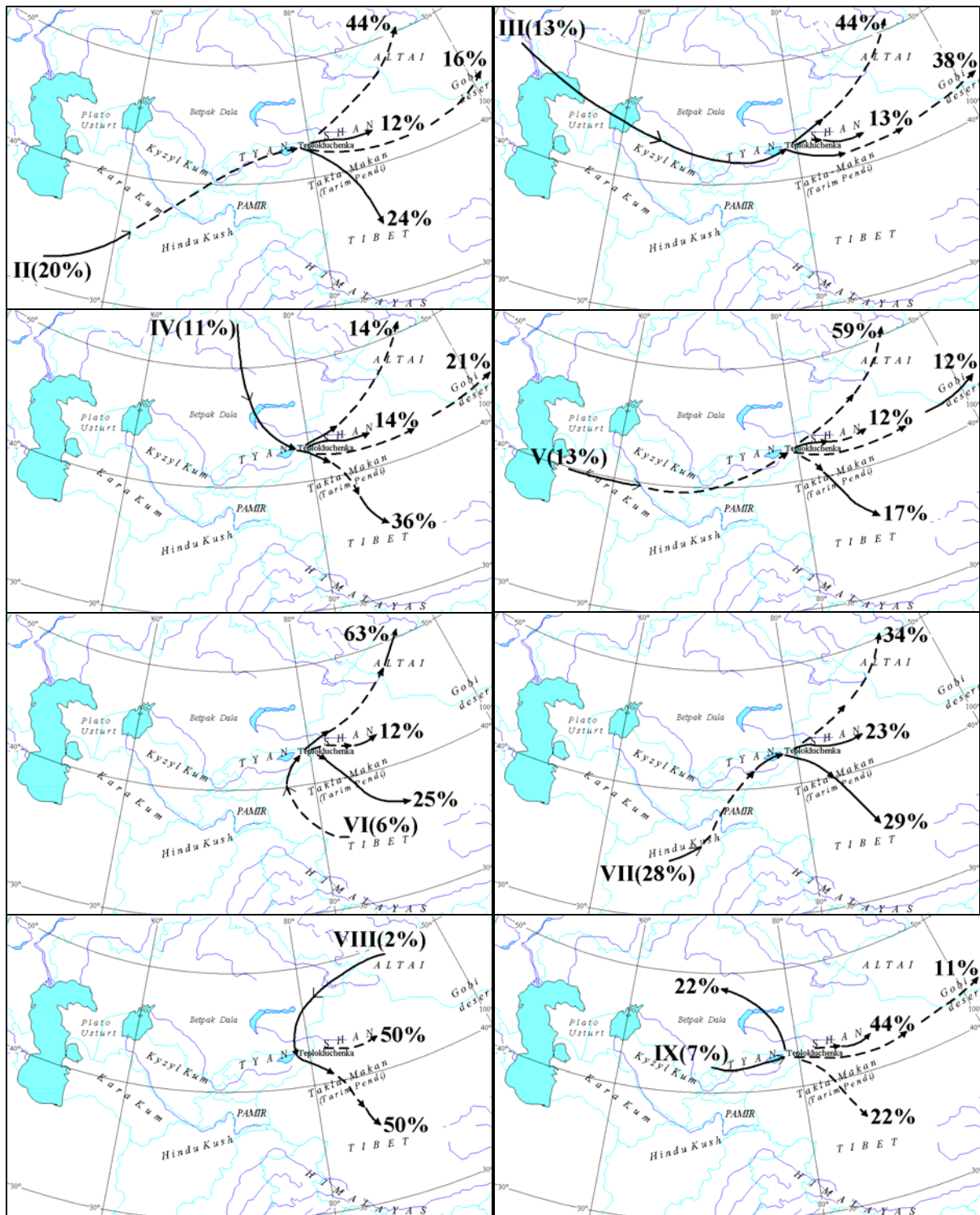


Рис. 6. Вероятности основных переходов обратных траекторий в зависимости от источника аэрозоля в прямые зимой.

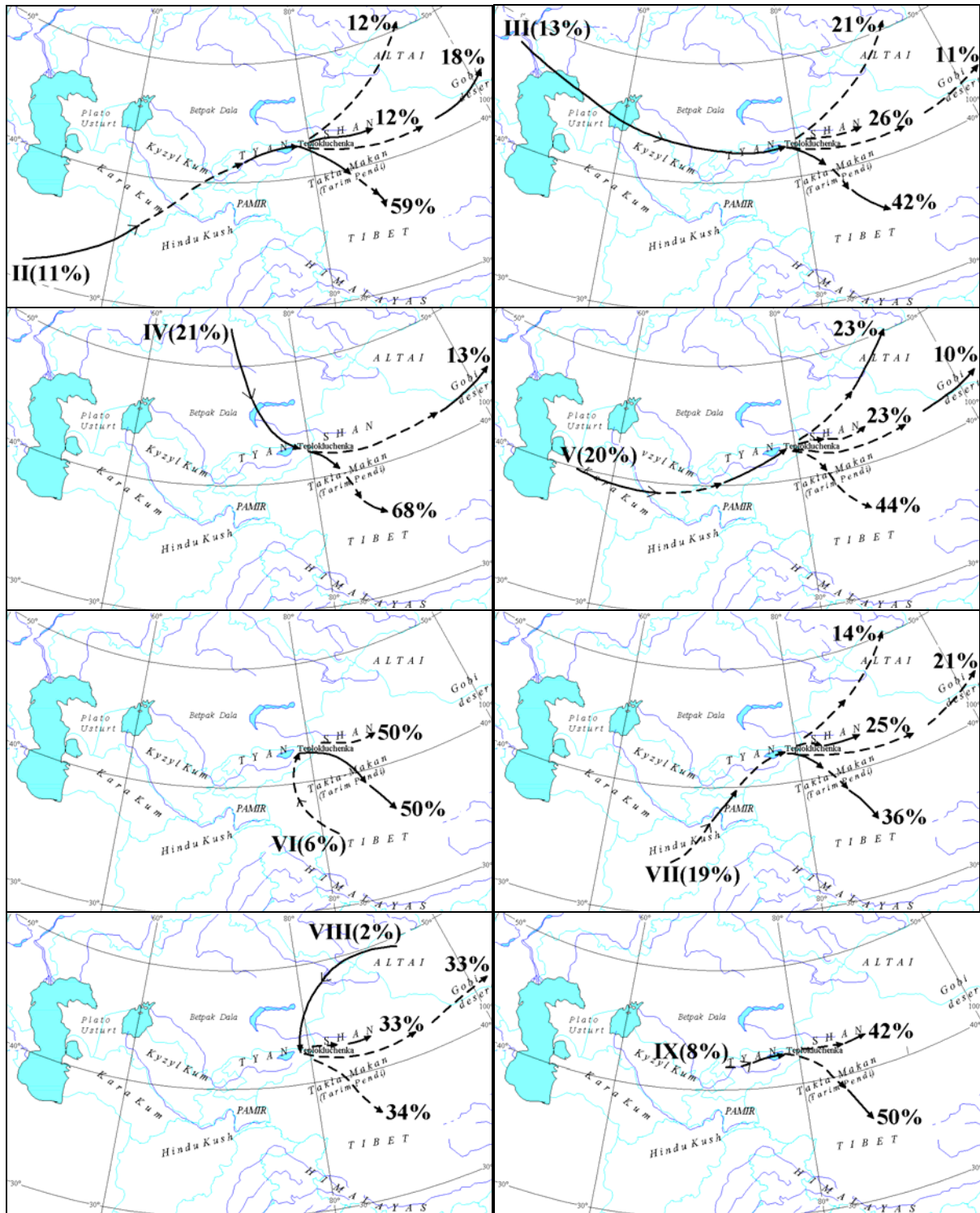


Рис. 7. Вероятности основных переходов обратных траекторий в зависимости от источника аэрозоля в прямые весной.

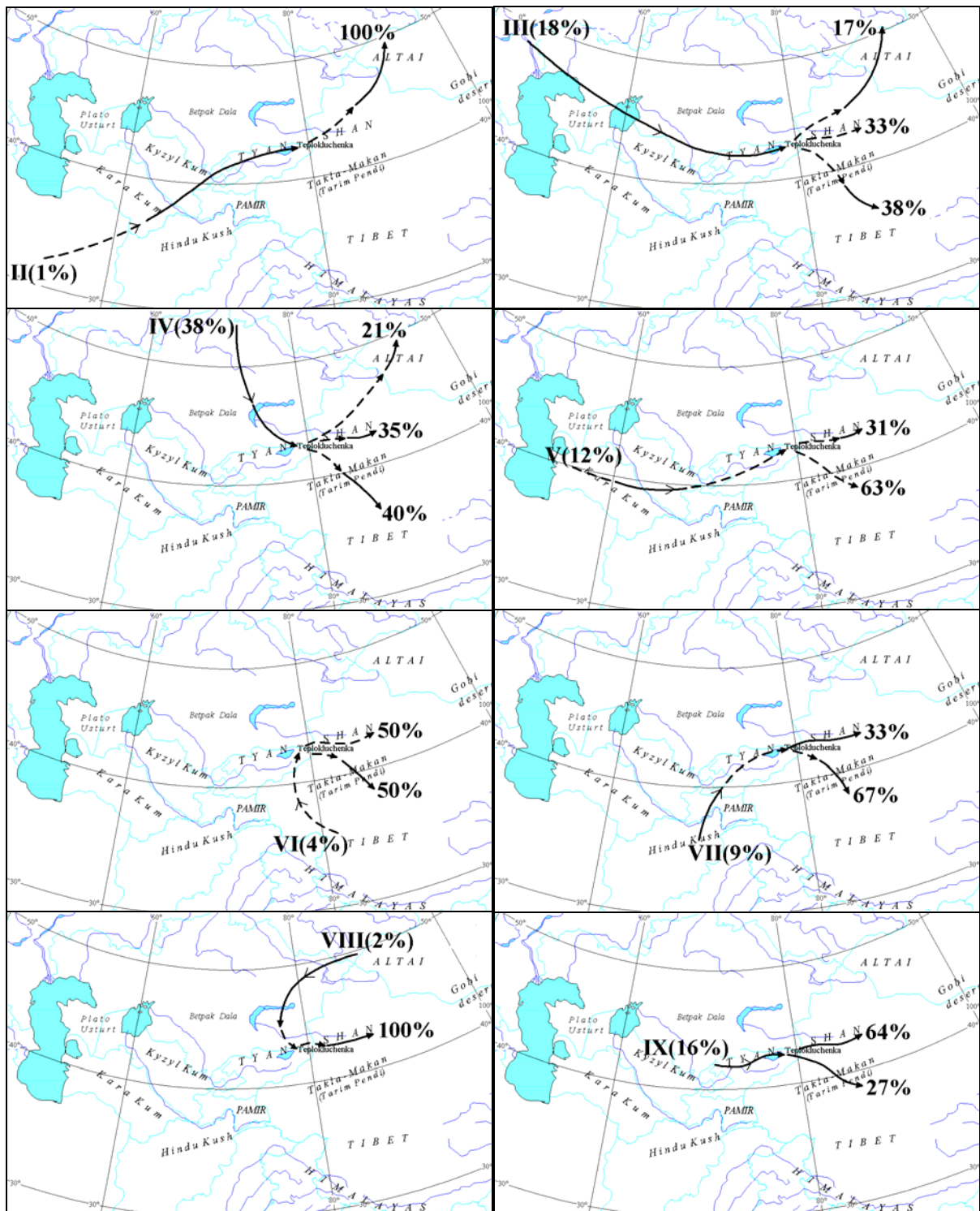


Рис. 8. Вероятности основных переходов обратных траекторий в зависимости от источника аэрозоля в прямые летом.

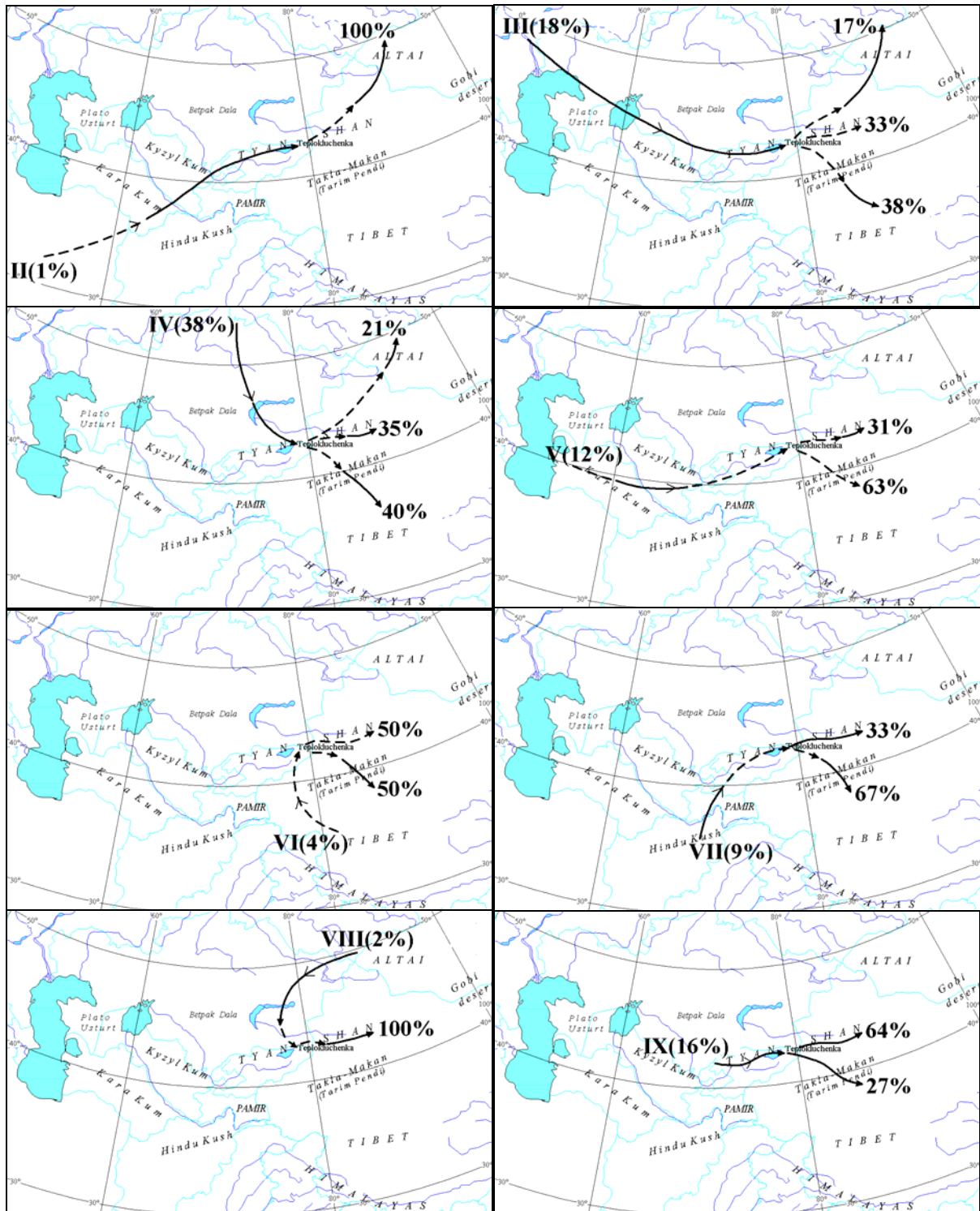


Рис. 9. Вероятности основных переходов обратных траекторий в зависимости от источника аэрозоля в прямые осенью.

Переходы ОТ типа II. Среднегодовая вероятность ОТ типа II составляет всего 9%, однако в загрязнение Центральноазиатской высокогорной системы этот источник аэрозоля вносит существенный вклад. В холодное полугодие при углублении ПВФЗ до районов Средиземного моря и Месопотамии скорость перемещения воздушных масс над Центральноазиатским регионом существенно увеличивается. Такая ситуация встречается довольно часто, поэтому и повторяемость траекторий с Ближневосточных пустынь (ОТ типа II) в этот период самая высокая в году – 20%. Дальнейший путь лежит, как правило, в северо-восточном направлении от Тянь-Шаня на Алтай и Саяны (44%). Весной вероятность ОТ типа II уменьшается до 11%, причем путь прямых траекторий имеет преимущественное направление на Такла-Макан и Тибет (59%). В теплый период такие траектории наблюдаются очень редко за счет смещения ПВФЗ к северу. Летом их вероятность составляет всего 1% всегда с продолжением на Алтай, осенью – 4% с равными вероятностями ПТ типов 2, 3, 5 на Алтай, Тянь-Шань или Тибет.

Зимой и весной восходящие движения, способствующие поднятию аэрозоля в тропосферу, наблюдаются преимущественно над пустынями Средней Азии (Каракумы, Кызылкум и Ферганской долиной). При прохождении над Тянь-Шанем часть аэрозоля вымывается при выпадении осадков, часть осаждается в результате сухого поглощения аэрозоля подстилающей поверхностью. Большая часть аэрозоля при развитой в горах конвекции поднимается по склонам в более высокие слои тропосферы. Летом поднятие аэрозоля осуществляется чаще над Ближневосточными пустынями, так как именно над этими районами в теплый период года поверхность земли и воздух над ней сильно прогреваются, способствуя формированию тропической воздушной массы. При подходе к горным районам аэрозоль при нисходящих потоках осаждается, способствуя образованию в приземном слое устойчивой завесы пыльной мглы, особенно в предгорьях, нижних и средних частях горных долин, котловин. Осенью генерация аэрозоля наблюдается над всеми пустынными районами, оседание происходит над Тянь-Шанем.

Переходы ОТ типа III. Обратные траектории типа III, проходящие над Приволжскими степями, степями и полупустынями Западного Казахстана, пустынями Южного Казахстана, в течение года колеблется в пределах 13–18%. Основное сезонное отличие по направлению имеют прямые траектории. Так, если зимой наибольшая вероятность переноса на Алтай (44%) и Монголию (38%), то весной преобладает перенос по ПТ типа 5 через пустыню Такла-Макан на Тибет и далее (44%). Летом аэрозоль медленно переносится на Такла-Макан (38%) или оседает на Тянь-Шане (33%). Осенью путь аэрозоля от Тянь-Шаня может продолжаться и в восточном (42%), и в северо-восточном (27%), и в юго-восточном (31%) направлениях. Во все сезоны обратным траекториям типа III сопутствуют нисходящие движения воздуха. Однако следует заметить, что в теплый период года даже при таких вертикальных движениях воздуха возможно поднятие аэрозоля за счет большого контраста земля – воздух.

Переходы ОТ типа IV. Казахстанский аэрозоль на территорию Тянь-Шаня поступает чаще всего. Вероятность его переноса на Тянь-Шань в среднем за год составляет 24%. В зимнее время повторяемость меньше, чем в остальные периоды (11%). Во все сезоны аэрозоль далее смещается чаще всего по прямым траекториям типа 5 (36%) через Такла-Макан на Тибет и далее. Около трети направлены на восток (ПТ типов 3, 4). Зимой 14–21% прямых траекторий переноса аэрозоля направлены на Алтай. При перемещении воздушных масс на Тянь-Шань с севера концентрации аэрозоля должны быть наиболее высоки в приземном слое, так как преобладают нисходящие движения воздуха. Однако у подножия горных систем развиваются восходящие движения за счет вынужденной конвекции. В результате часть аэрозоля при поднятии воздуха оседает на склонах гор, а другая часть выносится в более высокие слои тропосферы, в так называемую зону свободной атмосферы.

Переходы ОТ типа V. Обратные траектории со среднеазиатских пустынь составляют 15%. Зимой основная часть этих траекторий продолжает путь от Тянь-Шаня на Алтай (59%) по траекториям типа 2. Весной и осенью

разброс траекторий практически равномерно распределяется между северо-восточным, восточным и юго-восточным направлениями. Летом наибольшая вероятность ПТ типа 5 на Тибет и далее составляет 63%. В два раза реже аэрозоль задерживается над Тянь-Шанем. Если при ОТ типа III до Тянь-Шаня доходит небольшое количество аэрозоля с территории Аральского бассейна, то при ОТ типа V над пустынными районами Приаралья довольно часто наблюдаются пыльные бури, особенно в теплый период, вызывающие подъем пыли и соли до значительных высот – на несколько километров вверх. Шлейф Аральского аэрозоля достигает территории Тянь-Шаня и оказывает существенное влияние на загрязнение атмосферы и ледников данного района. Над горами Тянь-Шаня во все сезоны преобладают восходящие движения воздуха, способствующие распространению аэрозоля и на горные системы Алтая и Тибета.

Переходы ОТ типа VI. Группа обратных траекторий типа VI имеет повторяемость лишь 6%. Эти траектории играют очень важную роль для нашего региона, так как приносят аэрозоль, переваливший с ВМ через высочайшие горные системы Гималаев и Тибета, и аэрозоль, генерированный над огромной пустыней Такла-Макан. К естественным аэрозолям могут быть добавлены и антропогенные, связанные с Южно-Азиатским Коричневым Облаком. Эти обратные траектории переходят в ПТ типа 5 зимой в 25% случаев, весной и летом – в 50%, осенью – в 22%. Зимой вероятность перехода в ПТ типа 2 – 63%, весной и летом – 50%, осенью в 67% случаях аэрозоль задерживается над горными массивами Тянь-Шаня (ПТ типа 3). В очень редких случаях осенью этот индийский воздух проникает на территорию Казахстана. При перемещении ВМ по ОТ типа VI наблюдаются восходящие движения как над Центральноазиатскими горными массивами, так и над пустыней Такла-Макан. Этот малочисленный тип траекторий вносит существенный вклад в загрязнение Тянь-Шаня и его ледников, так как в этих случаях перенос загрязнения происходит даже с севера Индии (пустыня Тар). В этом случае ВМ загрязнены сажей и другими антропогенными аэрозолями из районов Южной Азии. Наибольшее оседа-

ние аэрозоля на Тянь-Шань с нисходящими потоками происходит в зимний период и несколько реже весной. В остальные сезоны аэрозоль частично осаждается при восходящем скольжении по склонам гор.

Переходы ОТ типа VII. Второй по повторяемости перенос масс ОТ типа VII наиболее часто наблюдается зимой (28%), немного реже весной и осенью (19 и 22% соответственно), очень редко (9%) – летом. Прямые траектории во все сезоны направлены преимущественно на юго-восток на Такла-Макан и восток – на Тянь-Шань и далее к пустыне Гоби. Проходя над юго-западом Центральноазиатского горного массива, ВМ теряют аэрозоль больше всего над Гиндукушем, где в течение всего года преобладают нисходящие потоки воздуха. Над Памиром и нередко над Тянь-Шанем наблюдается поднятие воздуха, часто связанное с расположением в этих районах хребтов и пиков выше 6–8 км.

Переходы ОТ типа VIII. С Алтая обратные траектории приносят аэрозоль на Тянь-Шань исключительно редко – лишь в 2% случаев, но встречаются во все сезоны. Такие траектории связаны чаще всего с образованием в средних и верхних слоях тропосферы высотного циклона, поэтому дальнейший путь аэрозоля с малыми скоростями лежит на Такла-Макан, Тянь-Шань и далее на восток. При перемещении воздушных масс на Тянь-Шань с северо-востока преобладают нисходящие движения воздуха. Однако у подножия горных систем развиваются восходящие потоки, в результате часть аэрозоля при поднятии воздуха оседает на склонах гор, а другая часть выносятся в более высокие слои тропосферы.

Переходы ОТ типа IX. ОТ типа IX также малочисленны (в среднем 10% случаев в год). Чаще всего такие траектории наблюдаются летом (16%), когда над регионом преобладает малоградиентное поле давления у поверхности земли и слабый западный перенос в тропосфере. Во все сезоны велика вероятность перехода в прямые траектории, направленные на Восточный Тянь-Шань и Такла-Макан. Осенью и зимой 20–22% траекторий направлены на северные пустыни Казахстана (ПТ типа 1). При циркуляции ВМ над Тянь-Шанем вертикальные движения в большей степени зависят от

орографических особенностей рельефа, обуславливающих деформационные изменения воздушного потока над мощными горными системами, своеобразно расчлененными многочисленными долинами и ущельями.

Заключение. Проведенная типизация обратных траекторий в зависимости от источника аэрозоля и типизация прямых траекторий позволила оценить наиболее вероятные перемещения загрязнения от региональных источников аэрозоля в зависимости от происхождения ВМ. Во все сезоны года, за исключением осени, наблюдаются преимущественные переходы ОТ в прямые определенной направленности. Так, зимой имеют место преимущественные переходы ОТ типов II–VII в ПТ типа 2, весной – переходы ОТ всех типов преимущественно в ПТ типа 5. Летом ОТ типа II в основном переходят в ПТ типа 2, а ОТ типов III–VIII – в ПТ типа 5. Следовательно, можно говорить о том, что дальнейший путь ВМ с аэрозольными загрязнениями лежит от Тянь-Шаня преимущественно на Монголию, северо-запад Китая и на Такла-Макан, Тибет и Гималаи.

Более сложная картина наблюдается осенью. В это время года отмечается большая не-

стабильность атмосферных процессов, следствием чего является большая неоднородность вероятных переходов ПТ в ОТ. Так, наряду с равновероятными переходами ОТ типов II, III и V в ПТ типов 2, 3 и 5, обнаруживаются преимущественные переходы ОТ типа VI в ПТ типа 3, ОТ всех типов, как и весной, в ПТ типа 5. Большая часть переносимых к Тянь-Шаню аэрозольных загрязнений далее поступает на Тянь-Шань (26,9 %) и Тибет (40,4 %). В зимнее время аэрозоль с пустынь Центральной Азии вносит существенный вклад в загрязнение горных территорий не только Тянь-Шаня, но и Алтая, Саян.

При построении обратных и прямых траекторий были учтены вертикальные движения воздушных частиц в турбулентном пограничном слое, где проходит большая часть процессов, способствующих генерации аэрозоля и переносу его на значительные расстояния. Этим можно объяснить подъем или осаждение аэрозоля, что позволяет выявить как основные очаги загрязнения ВМ аэрозолем, так и направления переноса его на различные регионы, в том числе и на горные массивы Центральной Азии.