

Н. В. Михайлова

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПОТОКА ВЛАГИ В АТМОСФЕРЕ НАД АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКИМ РЕГИОНОМ

По данным реанализа *NASA MERRA* за 1979 – 2014 гг. рассчитан интегральный горизонтальный поток влаги в атмосфере над Атлантико-Европейским регионом, проанализирована его временная изменчивость. Показано, что максимальное количество влаги переносится над умеренными широтами Атлантического океана (до 280 кг/(м·с)). В годовом ходе максимум влагопереноса приходится на летний период, минимум – на зимне-весенний.

Поток атмосферной влаги над территорией Европы в зимний, весенний и осенний периоды незначительно (около 5 – 10 кг/(м·с) за десятилетие) сокращается. Летом поток водяного пара возрастает над Атлантикой к югу от 52° с.ш. и над северными районами Европейской территории России (на 40 и 25 кг/(м·с) за 10 лет соответственно) и уменьшается над северными районами Атлантики и южными районами Европейской территории России (на 30 и 15 – 20 кг/(м·с) за 10 лет соответственно).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *водный баланс атмосферы, интегральный горизонтальный поток влаги, межгодовая изменчивость*

Введение. Важнейшей компонентой гидрологического цикла, которая влияет на перераспределение водяного пара в атмосфере, формирование источников и стоков водяного пара, а также определяет процессы влагооборота в атмосфере в целом, является перенос атмосферной влаги с воздушными течениями.

Водяной пар попадает в атмосферу благодаря испарению с земной поверхности, причем около 80 % испарившейся воды приходится на Мировой океан [1]. В то же время годовая сумма осадков, выпадающих на поверхность океана меньше, чем испарение. Избыток испарившейся влаги переносится воздушными течениями на континенты и во многом определяет условия увлажнения в конкретном районе Земли.

Черное море расположено внутри континента, на достаточно большом расстоянии от Атлантического океана и потому является основным источником влаги и играет главную климатообразующую роль в регионе [2]. Испарение с поверхности Черного моря интенсивно в течение всего года, достигая максимума в августе – сентябре (минимальное испарение – в апреле). В годовом ходе осадков минимум приходится на летнее время, а максимум – на зимнее. По данным работ [3, 4] в период с января по май осадки над Черным морем превышают испарение, но, начиная с мая, наоборот, испарение превышает осадки. При осреднении за год по оценкам различных авторов, приведенных в монографии [5], испарение над Черным морем на 15 – 40 % превышает осадки. Ослабление или интенсификация переноса влаги с атмосферными течениями способна изменить существующий баланс между осадками и испарением и повлиять на влагообеспеченность всего Атланти-

ко-Европейского региона и Черноморского региона в частности.

Цель настоящей работы состоит в оценке изменений переноса атмосферной влаги над Атлантико-Европейским регионом за последний климатический период 1979 – 2014 гг. Данная задача особенно актуальна в связи с наблюдающимися изменениями климата (глобальным потеплением).

Данные и методика расчета. В работе использовались данные реанализа *NASA MERRA (Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications)* за 1979 – 2014 гг. Величины удельной влажности, зональной и меридиональной составляющей скорости ветра представлены ежемесячно на равномерной сетке $0,5^\circ \times 0,67^\circ$.

Уравнение водного баланса атмосферы в упрощенном виде записывается как

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{F} = E - P, \quad (1)$$

где $W = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q dp$ – интегральное влагосодержание атмосферы, g – ускорение свободного падения (м/с^2), p_0 – атмосферное давление у поверхности (гПа), q – удельное влагосодержание атмосферы (г/кг), \mathbf{F} – интегральный горизонтальный поток водяного пара ($\text{кг/м} \cdot \text{с}$), E – испарение ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$), P – осадки ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$). При расчете показателей водного баланса за достаточно длительный промежуток времени первым членом уравнения (1) можно пренебречь (он слишком мал по сравнению с другими членами уравнения), тогда разность осадков и испарения уравнивается только притоком-оттоком водяного пара.

Из уравнения (1) следует, что горизонтальный перенос водяного пара является главным фактором изменения баланса испарения и осадков. Общий горизонтальный поток влаги определялся по формуле:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q \mathbf{V} dp,$$

где \mathbf{V} – горизонтальная скорость ветра (м/с). За верхнюю границу атмосферы принимался уровень $p = 300$ гПа.

Представим интегральный горизонтальный поток влаги в виде

$$\mathbf{F} = F_u \cdot \mathbf{i} + F_v \cdot \mathbf{j},$$

где \mathbf{i} и \mathbf{j} – единичные векторы, $F_u = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q u dp$, $F_v = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} q v dp$,

тогда

$$|\mathbf{F}| = \sqrt{F_u^2 + F_v^2}.$$

Параметры линейного тренда рассчитывались для $|\mathbf{F}|$ методом наименьших квадратов в каждом узле сетки. Оценка значимости коэффициента линейного тренда проводилась с использованием критерия Стьюдента для вероятности $\alpha = 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Для анализа пространственных изменений годового хода потока влаги в Атлантико-Европейском регионе были выделены 4 района размером $10^\circ \times 15^\circ$: Атлантический, Европейский, морской и север Европейской территории России (рис.1, а).

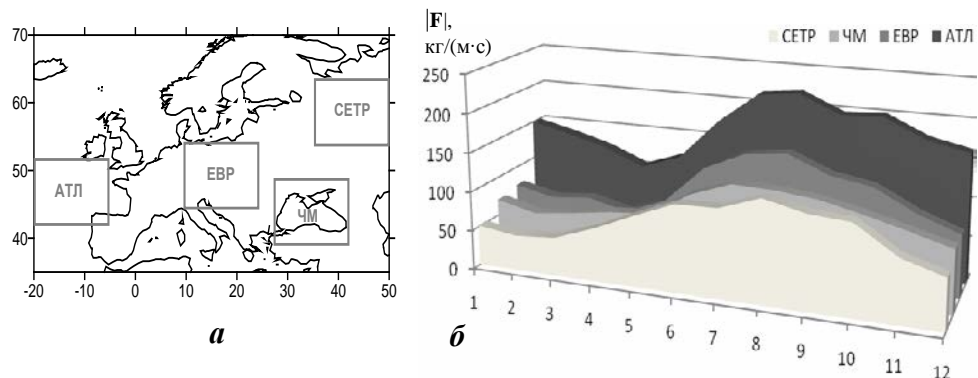


Рис.1. Карта районов Атлантико-Европейского региона (а) и средний многолетний годовой ход интегрального горизонтального потока атмосферной влаги (кг/(м·с)) в районах Атлантико-Европейского региона (б).

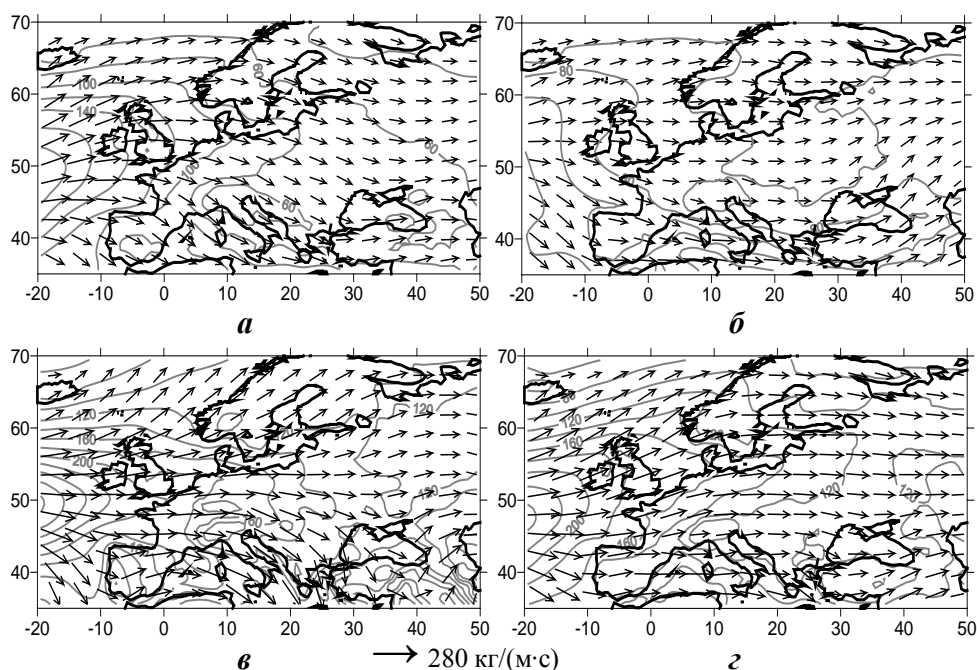
На рис.1, б видно, что с удалением от Атлантического океана поток влаги постепенно сокращается. Если над умеренными широтами Северной Атлантики среднегодовая величина влагопереноса составляет 165 кг/(м·с), то в центре Европы 102 кг/(м·с), над Черным морем 92 кг/(м·с) и 86 кг/(м·с) над северными районами Европейской территории России (ЕТР).

Многолетний годовой ход интенсивности горизонтального потока атмосферной влаги на западе и востоке Атлантико-Европейского региона различается. Над Черным морем он совпадает с сезонным ходом температуры поверхности моря (рис.1, б): минимум приходится на февраль (< 60 кг/(м·с)), когда температура поверхности моря минимальна, максимум – на июль – август, когда температура воды максимальна (> 120 кг/(м·с)). Такой же характер годового хода и над северными районами ЕТР.

Над Атлантикой минимум влагопереноса наблюдается в апреле (104 кг/(м·с)), а максимум – в августе (220 кг/(м·с)). Здесь, по-видимому, основную роль играет сезонное изменение структуры крупномасштабной циркуляции и, как результат, смещение траекторий циклонов, которые служат эффективным механизмом переноса влаги. Аналогичный атлантическому годовому ход наблюдается над Центральной Европой.

На рис.2 приведены средние многолетние карты потока влаги для центральных месяцев сезонов. Основной источник водяного пара на протяжении всего года располагается над Атлантикой. Отсюда водяной пар в системе крупномасштабных течений распространяется по всему региону. Наибольшая интенсивность горизонтального переноса влаги отмечается в полосе широт от 40° до 50° с.ш. в центре Северной Атлантики и меняется от 120 кг/(м·с) весной до 280 кг/(м·с) летом.

В зимнее время температура поверхности суши низкая, что сильно ограничивает возможности испарения. Поэтому сумма локальных осадков в любой части Европы на 95 % определяется адвекцией влаги из других регионов [6]. В Черноморский и Средиземноморский регионы влага поступает с северо-запада (рис.2, а). Ветры северо-западного направления, как правило, наблюдаются в тыловой части средиземноморских и атлантических циклонов. Холодный воздух отличается пониженным влагосодержанием, поэтому



Р и с . 2 . Средние многолетние карты модуля и направления вектора интегрального горизонтального потока влаги в атмосфере F в январе (а), апреле (б), июле (в), октябре (г). Изолиниями показана величина $|F|$.

интегральный поток водяного пара невелик. В Черноморском регионе $|F| \sim 70 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ в январе и еще меньше в феврале.

В то же время над умеренными и полярными широтами Атлантики и частично над ЕТР преобладает перенос с юго-запада на северо-восток. Благодаря этому, страны Скандинавии и центральные районы ЕТР обеспечиваются влагой в зимний период.

Весной постепенное выравнивание температурных контрастов моресуша, уменьшение барических градиентов и, как следствие, снижение интенсивности атмосферной циркуляции ведет к уменьшению потоков водяного пара на большей части Атлантико-Европейского региона. Заметное усиление влагопереноса наблюдается только на юге Средиземного моря и Малой Азии. По-видимому, это связано с сезонной динамикой субтропического струйного течения. По данным аэрологического зондирования на ст.Анкара (Турция) частота наблюдения струйного течения на уровнях 500 и 300 гПа в апреле выше, чем во все остальные месяцы года кроме июля. В отличие от Западной и Центральной Европы, где преобладает западное направление влагопереноса, в Черноморский регион влага поступает с юго-запада (рис.2, б). Это объясняет отсутствие минимума $|F|$ в весенний период, отмеченное выше.

В летние месяцы интегральное влагосодержание воздуха максимально. По этой причине, даже несмотря на уменьшение скорости ветра по сравнению с зимними условиями, величина интегрального влагопереноса во всем регионе возрастает. Результирующий поток водяного пара изменяется от 110 $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ на востоке до 280 $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ на западе Атлантико-Европейского региона (рис.2, в). Влажный воздух далеко проникает на восток. Например, если

проследить за крайним восточным положением изолинии $|F| = 140 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$, то зимой она достигает 5° з.д., а летом – 28° в.д. В Черноморском регионе преобладают воздушные потоки с северо-востока, но при общем высоком влагосодержании воздушных масс это не приводит к снижению потока влаги, как это наблюдается в зимний период.

Осенью влагосодержание воздуха и величина потоков влаги несколько уменьшается по сравнению с летним сезоном, но структура поля интегрального горизонтального потока влаги сохраняется (рис.2, з). Изолиния $|F| = 140 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ достигает 20° в.д. Кроме того, над всем регионом зональный поток влаги заметно преобладает над меридиональным. Таким образом, в осенний период замедлен межширотный обмен влагой.

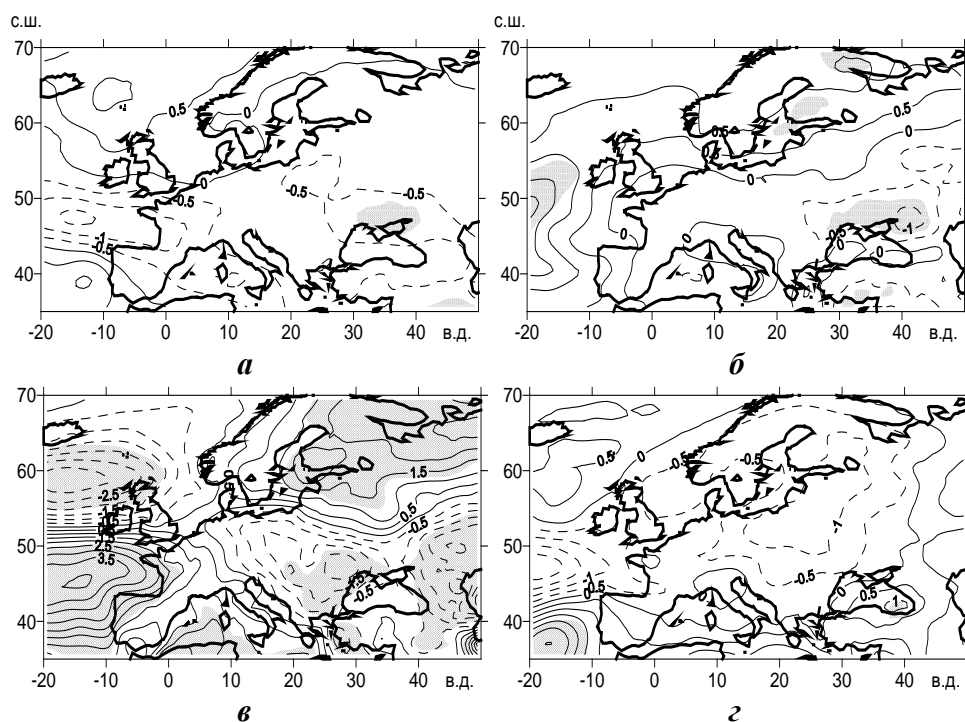
Для анализа климатических изменений в каждом узле сетки региона для каждого месяца были рассчитаны параметры линейного тренда модуля интегрального горизонтального потока влаги. Два основных фактора – скорость ветра и влагосодержание атмосферы – определяют изменчивость F . Существенные изменения средней скорости ветра в столбе атмосферы, как правило, связаны с динамикой струйных течений. Скорости ветра на оси струйного течения, превышают $30 \text{ м}/\text{с}$, а максимальные скорости ветра над Северной Атлантикой зимой могут достигать $80 - 100 \text{ м}/\text{с}$, летом – $60 - 70 \text{ м}/\text{с}$ [7]. Также по сведениям [7] струйные течения умеренных широт отличаются высокой пространственно-временной изменчивостью и являются составной частью высотных фронтальных зон.

Изменение интегрального влагосодержания атмосферы над районами суши определяется главным образом адвекцией. Поступление водяного пара во внутриматериковые районы Евразии осуществляется при помощи нескольких механизмов. Наиболее эффективно влага переносится с циклонами. При этом сами процессы циклогенеза, направление перемещения циклонов, так же как и струйные течения, тесно связаны с высотными фронтальными зонами. Вторым по значимости механизмом является перенос влаги в системе фронтальных струйных течений, и наименьшее количество влаги поступает в результате адвекции водяного пара с внутриматериковыми воздушными течениями [8].

На рис.3 приведено пространственное распределение коэффициентов линейного тренда для центральных месяцев сезонов.

Зимой значимый отрицательный тренд интегрального горизонтального потока влаги наблюдается только в Северном Причерноморье (около $5 - 7 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ за 10 лет). Над всей Европой на протяжении последнего климатического периода наблюдается незначительное (около $3 - 5 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ за 10 лет) сокращение объема влагопереноса. При этом над акваторией Северо-Европейских морей Арктического бассейна и в субтропических районах Северной Атлантики влагоперенос возрастает ($+5 - +10 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ за 10 лет). По-видимому, меридиональное смещение струйного течения [7] наряду с повышением интегрального влагосодержания атмосферы под влиянием глобального потепления является основной причиной изменения влагопереноса над умеренными широтами Северной Атлантики.

Весной тенденции изменения влагопереноса над Атлантико-Европейским регионом в целом соответствуют зимним условиям. Наиболее высокие



Р и с . 3 . Коэффициенты линейного тренда интегрального горизонтального потока влаги в атмосфере для января (*а*), апреля (*б*), июля (*в*), октября (*з*). Области значимых на уровне 95 % коэффициентов показаны точками.

темпы увеличения горизонтального потока влаги отмечаются над умеренными широтами Северной Атлантики (+5 – +20 кг/(м·с) за 10 лет). Над территорией Европы за исключением узкой полосы на севере ЕТР поток влаги сокращается. Наиболее интенсивно этот процесс проявляется в северном Причерноморье (– 5 – – 10 кг/(м·с) за 10 лет).

Самые значительные изменения по сравнению с другими сезонами наблюдаются в июле над акваторией Северной Атлантики. В полосе широт 40 – 50° с.ш. перенос влаги интенсивно возрастает на 40 кг/(м·с) за 10 лет, одновременно в полосе широт 55 – 65° с.ш. он уменьшается на 30 кг/(м·с) за 10 лет. Такая динамика, по-видимому, объясняется смещением к югу шторм-треков атлантических циклонов и струйного течения над Атлантикой. Обратная картина наблюдается над Центральной и Восточной Европой: на севере Европейской территории России поток влаги возрастает на 25 кг/(м·с) за 10 лет, на юге – сокращается на 20 кг/(м·с) за 10 лет. Следовательно, струйное течение над Атлантико-Европейским регионом приобретает к концу анализируемого периода более «волнистый» характер. Это означает повышение повторяемости меридиональных атмосферных процессов в атмосфере. Рост температуры воздуха в связи с глобальным потеплением и повышение влагосодержания воздуха также вносит определенный вклад, но гораздо менее весомый, чем тот, который связан с изменением скорости ветра на высотах. Большая часть влаги, которой обогащаются воздушные массы над Северной Атлантикой, переносится в северные районы Европы,

постепенно создавая дефицит увлажнения в Восточной Европе, включая Причерноморье и северную часть Черного моря.

Осенью значимые положительные тренды изменения влагопереноса наблюдаются над субтропическими районами Северной Атлантики и в юго-восточной части Черного моря (+5 – +10 кг/(м·с) за 10 лет). Последние, по-видимому, связаны с повышением частоты образования циклонических мезомасштабных вихрей в этой части моря [9].

Выводы. Использование данных реанализа *NASA MERRA* позволило уточнить характеристики влагопереноса в Атлантико-Европейском регионе и проанализировать их временную изменчивость за последний климатический период 1979 – 2014 гг.

В годовом ходе минимальная интенсивность влагопереноса отмечается в феврале (восток Атлантико-Европейского региона) или в апреле (запад Атлантико-Европейского региона), максимальная – в августе.

На протяжении всех месяцев года центральные районы Северной Атлантики характеризуются повышенными величинами потоков влаги: от 120 кг/(м·с) в апреле до 280 кг/(м·с) в августе.

Пространственное распределение потоков влаги находится под воздействием двух основных факторов – влагосодержания воздуха и скорости ветра – и зависит от расстояния до Атлантического океана.

Тенденции изменения потоков влаги свидетельствуют об их уменьшении в зимний, весенний и осенний периоды над территорией Европы в среднем на 5 – 10 кг/(м·с) за 10 лет. В летний период над Атлантикой и Центральной и Восточной Европой наблюдаются самые высокие темпы изменения влагопереноса. Над Атлантикой к северу от 55° с.ш. поток влаги уменьшается на 30 кг/(м·с) за 10 лет, одновременно, к югу от 50° с.ш. перенос интенсивно возрастает на 40 кг/(м·с) за 10 лет. На севере ЕТР поток влаги увеличивается на 25 кг/(м·с) за 10 лет, на юге – сокращается на 20 кг/(м·с) за 10 лет. Такая тенденция объясняется повышением повторяемости меридиональных форм циркуляции атмосферы к концу анализируемого периода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов О.А. Климатология.– Л.: Гидрометеиздат, 1989.– 568 с.
2. Ефимов В.В., Анисимов А.Е. Влияние Черного моря на региональный климат // Морской гидрофизический журнал.– 2012.– № 2.– С.37-49.
3. Симонов А.И., Альтман Э.Н. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Черное море. Гидрометеорологические условия. Проект “Моря СССР”.– т.4, вып.1.– Л.: Гидрометеиздат, 1991.– 430 с.
4. Romanou A., Tselioudis G., Zerefos C.S., Clayson C.-A., Curry J.A., Andersson A. Evaporation-precipitation variability over the Mediterranean and the Black Seas from satellite and reanalysis estimates // J. Climate.– 2010.– 23. – P.5268-5287.
5. Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– 212 с.
6. Trenberth K.E. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation // J. Climate.– 1999.– 12.– P.1368-1381.
7. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология.– Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.

8. *Грушевский О.Н.* Особенности фронтального влагооборота над Атлантико-Европейским сектором в современных климатических условиях // *Мет., клім. та гідрологія.* – 2005. – вип.49. – С.156-163.
9. *Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А., Хейн Д.* Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем // *Морской гидрофизический журнал.* – 2009. – № 4. – С.19-33.

Материал поступил в редакцию 26.05.2016 г.
После доработки 18.06.2016 г.

N. V. Mikhailova

CLIMATE VARIABILITY OF ATMOSPHERIC INTEGRATED HORIZONTAL MOISTURE FLUX OVER THE NORTH ATLANTIC-EUROPEAN REGION

Using NASA MERRA reanalysis for 1979 – 2014 an integrated horizontal moisture flux in the atmosphere over the Atlantic-European region is calculated and its temporal variability is analyzed. It is shown that the maximum moisture transported over the midlatitudes of the Atlantic Ocean (up to 280 kg / (m·s)). In the course of the annual maximum moisture flux is in the summer, minimum – in the winter and spring.

The atmospheric moisture flux over Europe in winter, spring and autumn is reduced about 5 – 10 kg / (m·s) per decade. In summertime moisture flux arises over the Atlantic south off 52N and over the northern regions of European Russia (40 and 25 kg / (m·s) for 10 years, respectively) and decreases over northern Atlantic and southern regions of European Russia (30 and 15 – 20 kg / (m·s) 10 years, respectively).

KEYWORDS: atmospheric water balance, integrated horizontal moisture flux, interannual variability