

## ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА МАКРОЗАВИХРЁННОСТИ В НИЖНЕЙ ПОЛОВИНЕ ТРОПОСФЕРЫ АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОГО СЕКТОРА СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Арсланова З.Л., студент

E-mail: zarina.arslanova.96@mail.ru

Казанский (Приволжский) федеральный Университет, г. Казань

### Аннотация

Получены оценки режима макрозавихрённости и её изменений в нижней половине тропосферы Атлантико-Европейского сектора Северного полушария в период 1979-2016 гг. в январе и июле с использованием 37-летних данных реанализа ERA-Interim.

**Ключевые слова:** общая циркуляция атмосферы, центры действия атмосферы, геопотенциал, макрозавихрённость.

**Введение.** Режим завихрённости является важным составляющим в системе общей циркуляции атмосферы (ОЦА), обеспечивающим макротурбулентный обмен огромными массами воздуха, теплом, влагой и энергией сразу в трёх направлениях: между низкими и высокими широтами, океанами и континентами и, наконец, верхними и нижними слоями атмосферы.

Актуальность данной темы заключается в том, что циклоническая деятельность оказывает непосредственное влияние на формирование условий погоды и климата, в целом, и влияет на жизнь и хозяйство человека. Изменение режима завихрённости в атмосфере, смещение характерных путей циклонов и антициклонов и их интенсивности приводит к усиленным осадкам в одних регионах и иссушению в других (Акперов, Мохов, 2010).

При глобальных изменениях климата изменяется и режим завихрённости в атмосфере. В настоящее время разработаны различные алгоритмы изучения характеристик внетропических циклонов и получено достаточно много результатов анализа региональных и глобальных режимов завихрённости и её изменений при климатических изменениях с помощью данных реанализа и расчётов с климатическими моделями ОЦА (Акперов, Мохов, 2013).

Также, на сегодняшний день получены количественные оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внетропических широт к изменению температурного режима с использованием 60-летних данных NCEP/NCAR реанализа. Отмечено, что наиболее значимые изменения циклонической активности связаны с вертикальным градиентом температуры в тропосфере (Акперов, Мохов, 2013).

Цель данной работы – изучение режима макрозавихрённости и её изменений в нижней половине тропосферы Атлантико-Европейского сектора Северного полушария.

**Характеристика исходных данных и методика исследования.** В качестве исходного материала для получения оценок режима макрозавихренности (далее завихренности) и её изменений в нижней половине тропосферы использовались 37-летние данные реанализа ERA-Interim, выпускаемые Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды [Электронный ресурс]: офиц. сайт).

ERA-Interim – глобальный реанализ, изучающий изменения климата за последние десятилетия. Представляет собой набор данных в узлах регулярной сетки с шагом  $0,7^\circ$  на 37-ми уровнях атмосферы (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды [Электронный ресурс]: офиц. сайт).

В настоящей статье были использованы среднемесячные данные реальной завихренности, с шагом сетки 1 на  $1^\circ$ , нижней половины тропосферы Атлантико-Европейского сектора Северного полушария, рассчитанные на основе данных о реальном ветре, в период 1979-2016 гг. В качестве дополнительных материалов, для исследования завихренности, были использованы среднемесячные данные геопотенциала на изобарических поверхностях 1000, 850, 700 и 500 гПа.

По данным в узлах сетки с шагом 1 на  $1^\circ$  за период 1979-2016 гг. было проведено осреднение геопотенциала на изобарических поверхностях 1000, 850, 700 и 500 гПа, а также завихренности на этих поверхностях. Таким образом, были получены ряды геопотенциала и завихренности нижней половины тропосферы Атлантико-Европейского сектора. Были рассчитаны среднемесячные значения коэффициента наклона линейного тренда для завихренности и построены картосхемы полей геопотенциала, завихренности и коэффициента наклона линейного тренда.

Далее, путем линейного тренд анализа и при помощи низкочастотного фильтра Поттера (Отнес, Эноксон, 1982) исследовались особенности изменения завихренности нижней половины тропосферы Атлантико-Европейского сектора в районах наиболее существенных изменений завихренности.

**Результаты исследования.** Рассмотрим поле геопотенциала и завихренности в нижней половине тропосферы Атлантико-Европейского сектора Северного полушария в период 1979-2016 гг. в январе и июле.

В январе на изобарической поверхности 1000 гПа в поле геопотенциала наблюдаются три центра действия атмосферы: Исландский минимум, расположенный над южными побережьями Гренландии и Исландии, Гренландский максимум, выраженный в виде гребня, над северной частью острова Гренландия, а также Азорский и Сибирский максимумы, которые наблюдаются над Азорскими островами и Центральной Азией - Сибирью, соответственно.

С высотой поле геопотенциала сглаживается. На изобарической поверхности 850 гПа также наблюдаются три центра действия атмосферы. Центр Исландского минимума смещается к северо-западу и располагается над морем Баффина, а Азорский и Сибирский максимумы становятся более размытыми. Далее на изобарической поверхности 700 гПа центр Исландского минимума смещается ещё западнее и устанавливается над островом Баффина Земля, а Азорский и Сибирский

максимумы и вовсе сливаются в одно единое поле повышенного геопотенциала. И, наконец, на изобарической поверхности 500 гПа картина, практически, остается неизменной по сравнению с уровнем 700 гПа, а поле геопотенциала становится ещё более сглаженным.

Поле завихренности существенно более изменчиво, чем поле геопотенциала. В районе Исландского минимума на изобарической поверхности 1000 гПа, в целом, наблюдается очаг положительной завихренности с максимальными значениями до  $20 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ . Однако, над частью острова Гренландия, где в поле геопотенциала также наблюдается Исландский минимум, преобладает отрицательная завихренность порядка  $-20 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ , что является результатом влияния гребня Гренландского максимума и влияния подстилающей поверхности на режим завихренности. В районе Сибирского максимума наблюдаются и положительная, и отрицательная завихренности, что также отражает влияние особенностей подстилающей поверхности на режим завихренности. А вот в районе расположения Азорского максимума чётко выраженных центров завихренности не наблюдаются.

На изобарической поверхности 850 гПа максимальная положительная завихренность также наблюдается над южным побережьем Гренландии и составляет порядка  $20 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ , а отрицательная завихренность наблюдается над районом острова Гренландия порядка  $-20 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ . Над районом Азорских островов поле завихренности остается размытым, а вот в районе Сибирского максимума уже преобладает отрицательная завихренность, так как влияние подстилающей поверхности на верхней границе пограничного слоя становится меньше.

На изобарических поверхностях 700 и 500 гПа поле завихренности еще более сглажено. Положительная завихренность также наблюдается в районе Исландского минимума (над южным побережьем Гренландии) и уже составляет  $10 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ , а отрицательная завихренность, наблюдающееся над Гренландией, составляет величину около  $-20 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ . В области Сибирского максимума отрицательная завихренность усиливается до величины  $-20 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ . Также усиливается завихренность и в районе Азорского максимума до значений порядка  $-10 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ .

В июле на изобарической поверхности 1000 гПа, также как и в январе, наблюдаются три центра действия атмосферы: Исландский минимум, который располагается над южным побережьем острова Исландия, Азиатский минимум - над Центральной Азией – Сибирью и Азорский максимум, находящийся над Азорскими островами.

На изобарической поверхности 850 гПа в поле геопотенциала прослеживаются лишь два центра действия атмосферы. Гребень Азорского максимума, простирающийся до Центральной Азии, вынуждает Азиатский минимум сместиться к северу и слиться с Исландским минимумом. А на изобарических поверхностях 700 и 500 гПа и вовсе наблюдается сглаженное поле геопотенциала. Пониженные значения геопотенциала занимают приполярный район, а к югу простирается область повышенного геопотенциала.

Следует отметить, что в зимний период лучше выражены минимумы геопотенциала, а в летний период – максимумы.

На поверхности 1000 гПа поле завихрённости в июле в районе Исландского минимума, в целом, положительно, а вот над самим островом Исландия, вследствие влияния подстилающей поверхности, наблюдается, хоть и слабая, но отрицательная завихрённость. Над океанической поверхностью в районе Азорского максимума, завихрённость отрицательна, а над континентальной поверхностью в районе Азиатского минимума наблюдается как положительная, так и отрицательная завихрённости.

На изобарической поверхности 850 гПа, также как и на 1000 гПа, в районе Исландского минимума наблюдается положительная завихрённость, а над островом Исландия – отрицательная. Отрицательная завихрённость в районе Азорского максимума усиливается, также она усиливается и над Центральной Азией (туда на поверхности 850 гПа простирается гребень Азорского максимума).

На изобарических поверхностях 700 и 500 гПа отрицательная завихрённость в районе Азорского максимума составляет величину  $-10 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ . Над Центральной Азией она достигает значений около  $-20 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ . А в районе Исландского минимума и над Сибирью положительная завихрённость несколько выше значения  $10 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ .

Однако наличие очагов завихрённости с максимальными значениями не всегда свидетельствует о её изменениях во времени. Рассмотрим изменения поля завихрённости над Атлантико-Европейским сектором Северного полушария в период 1979-2016 гг. в январе и июле.

В январе на изобарической поверхности 1000 гПа усиление завихрённости наблюдается в районах Исландского минимума и Гренландского максимума, то есть в регионах преобладания положительной и отрицательной завихрённостей, соответственно. Также, очаги усиления положительной завихрённости наблюдаются над Пиренейским полуостровом, точнее над его южным и восточным побережьями. Незначительное усиление отрицательной завихрённости наблюдается над Азорскими островами, а вот в районе Сибирского максимума, наоборот, отрицательная завихрённость слабеет.

На изобарической поверхности 850 гПа усиления положительной и отрицательной завихрённостей в районах Исландского минимума и Гренландского максимума сохраняются. Слабое усиление отрицательной завихрённости сохраняется также и в районе Азорского максимума. А вот над Пиренейским полуостровом, где наблюдается отрицательная завихрённость, происходит её ослабление. Также ослабление завихрённости сохраняется в районе Сибирского максимума.

На изобарической поверхности 700 гПа усиление положительной завихрённости в районе Исландского минимума продолжается. А вот над Гренландией, где на 1000 и 850 гПа происходило усиление отрицательной завихрённости, появляются очаги ослабления. Над Пиренейским полуостровом продолжает сохраняться ослабление отрицательной завихрённости, а вот в районе Азорского максимума отрицательная завихрённость на этой поверхности усиливается

гораздо интенсивнее. Над Центральной Азией – Сибирью наблюдается усиление как положительной завихрённости, так и отрицательной.

И, наконец, на изобарической поверхности 500 гПа в январе продолжает усиливаться положительная завихрённость в районе Исландского минимума, а также снова начинает усиливаться отрицательная завихрённость над Гренландией. Интенсивное усиление отрицательной завихрённости наблюдается и в районе Азорского максимума, над Пиренейским полуостровом отрицательная завихрённость продолжает ослабевать. А вот в районе Сибирского максимума начинают ослабевать и положительная, и отрицательная завихрённости.

В июле на поверхности 1000 гПа, также как и в январе, наблюдаются очаги усиления положительной завихрённости в районе Исландского минимума и отрицательной в районе Гренландского максимума. Южнее острова Исландия, где преобладает положительная завихрённость, происходит ее ослабление. А ещё южнее там, где наблюдается Азорский максимум, происходит, также как и зимой, слабое усиление отрицательной завихрённости. В районе Азиатского минимума наблюдается ослабление положительной завихрённости.

На изобарической поверхности 850 гПа ситуация аналогична, а на изобарической поверхности 700 гПа ситуация немного меняется. Если на 1000 и 850 гПа наблюдалось усиление отрицательной завихрённости над Гренландией, то здесь наблюдается её ослабление. Также ослабевает отрицательная завихрённость в области Азорского максимума.

На поверхности 500 гПа в июле также наблюдается ослабление завихрённости Гренландского максимума. Ослабление положительной завихрённости наблюдается в районе Исландского минимума, а отрицательная завихрённость в районе Азорского максимума, наоборот, усиливается. В районе Азиатского минимума положительная завихрённость на этой изобарической поверхности продолжает ослабевать.

Отметим, что летом завихрённость в тропосфере гораздо слабее, чем зимой.

Рассмотрим изменения завихрённости в центрах действия атмосферы Атлантико-Европейского сектора Северного полушария в период 1979-2016 гг. в январе и июле с помощью линейного тренд анализа и сглаживания низкочастотным фильтром Поттера.

Рассмотрим Исландский минимум в январе (рис. 1) на изобарической поверхности 1000 гПа. Данный ряд линейный тренд описывает плохо. Однако после фильтрации детально видно, что в период 1979-2003 гг. наблюдалось ослабление (на  $-6 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ), а с 2003 по 2016 гг. – усиление завихрённости (на  $6 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ). На изобарической поверхности 850 гПа линейный тренд также незначим, но после фильтрации выделяются два периода усиления и ослабления завихрённости. Наибольшее ослабление завихрённости происходит в период 1988-2000 гг., а усиление - в период 2000-2014 гг. (на  $14 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ). На поверхности 700 гПа после детального рассмотрения наблюдаются два периода (1979-1989 гг. – на  $4 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$  и 2001-2016 гг. – на  $16 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) усиления завихрённости, а в периода 1989-2001 гг. наблюдается ослабление (на  $-12 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ). И, наконец, на поверхности 500 гПа

наблюдаются два периода ослабления и усиления. Наибольшее ослабление (на  $-13 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) происходит в период 1989-2002 гг., а усиление (на  $15 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) в период 2002-2016 гг.

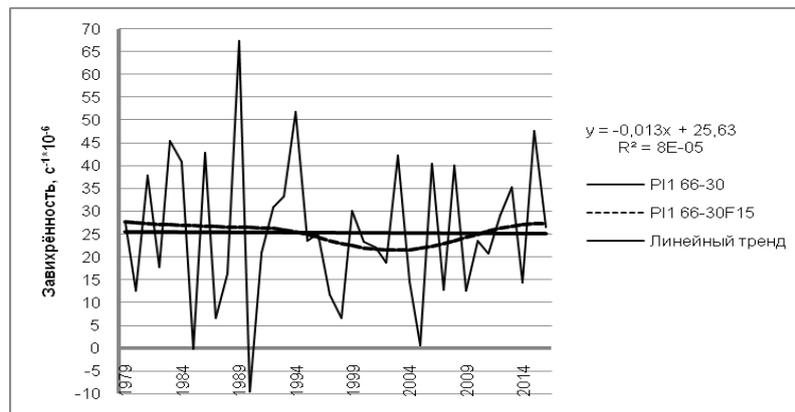


Рис. 1. Многолетний ход завихрённости в январе в Исландском минимуме на изобарической поверхности 1000 гПа (P1166-30 – ряд завихрённости, P1166-30F15 – низкочастотная компонента (НЧК) с периодом более 15 лет)

В июле в области Исландского максимума на поверхности 1000 гПа линейный тренд незначим. После низкочастотной фильтрации выявляются два периода усиления и ослабления завихрённости. Наибольшее ослабление (на  $-9 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) имеет место в период 1988-2000 гг., а усиление (на  $14 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) в период 2000-2014 гг. На поверхности 850 гПа (рис. 2) линейный тренд, в целом, указывает на ослабление завихрённости (коэффициент наклона линейного тренда статистически значим на уровне 5%). Наблюдаются также два периода усиления и ослабления завихрённости. Наибольшее усиление (на  $9 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) просходит в период 1992-2003 гг., а ослабления (на  $-17 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) в период 2003-2016 гг. На поверхностях 700 и 500 гПа ситуация аналогичная.

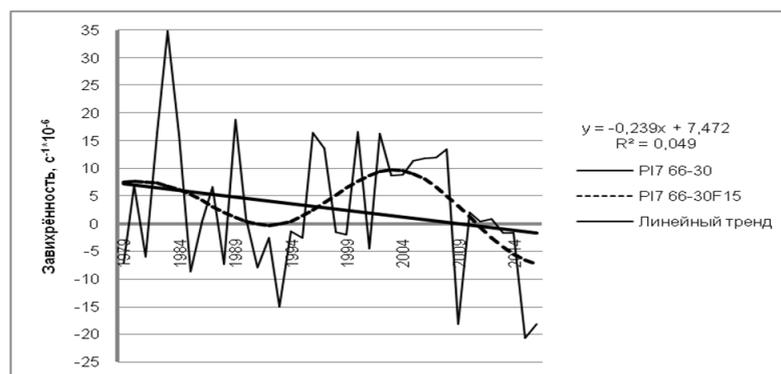


Рис. 2. Многолетний ход завихрённости в июле в Исландском минимуме на изобарической поверхности 850 гПа

Рассмотрим характер изменения завихренности в области Гренландского максимума в январе. На изобарической поверхности 1000 гПа (рис. 3) положительный тренд статистически значим. И после фильтрации видно, что наблюдаются два периода (1979-1988 гг. – на  $5 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$  и 1999-2016 гг. – на  $9 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) ослабления и один

период (1988-1999 гг. – на  $-7 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) усиления завихрённости. В целом, на поверхности 850 гПа ситуация повторяется. На поверхностях 700 и 500 гПа и вовсе тренды незначимы и наблюдаются два периода ослабления и усиления завихрённости.

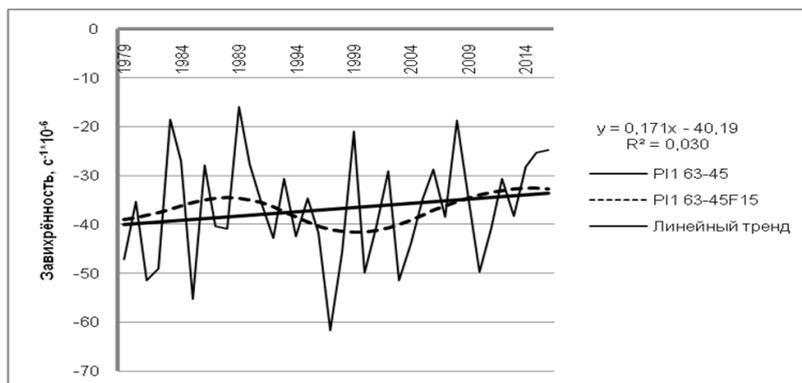


Рис. 3. Многолетний ход завихрённости в январе в Гренландском максимуме на изобарической поверхности 1000 гПа

В июле в области Гренландского максимума на поверхности 1000 гПа, также как и в январе, линейный тренд достаточно хорошо описывает ослабление завихрённости. После фильтрации выделяются два периода (1979 - 1988 гг. – на  $5 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$  и 1999-2016 гг. – на  $14 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) ослабления и один период (1988-1999 гг. – на  $-8 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) усиления завихрённости. На поверхностях 850 и 700 гПа ситуация аналогичная. А вот на поверхности 500 гПа наблюдаются уже три периода ослабления завихрённости и два периода усиления. Наибольшее усиление (на  $-4 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) в период 1980-1992 гг., а ослабление (на  $4 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) в период 1992-2004 гг.

В области Сибирского максимума, наблюдающегося только в зимний период на всех изобарических поверхностях линейный тренд указывает на интенсивное ослабление завихрённости. И в среднем это ослабление происходит в период 1981-2001 гг.

В июле, когда наблюдается Азиатский минимум, на изобарической поверхности 1000 гПа наблюдается усиление завихрённости, а вот на других высотах, наоборот, ослабление.

И, наконец, рассмотрим изменение завихренности в области Азорского максимума. В январе на поверхности 1000 гПа наблюдается слабое усиление завихренности, а при детальном исследовании выявляются два периода – это ослабление (1979-1994 гг.) и усиление (1994-2016 гг.). А на поверхности 850 гПа (рис. 4) линейный тренд указывает на интенсивное ослабление завихрённости в целом и выявляются два периода – усиление (на  $-5 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) в период 1979-1991 гг. и ослабление (на  $7 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-6}$ ) в период 1991-2016 гг. На изобарических поверхностях 700 и 500 гПа линейный тренд незначим и выделяются два периода – это усиление в период 1979-1991 гг. и ослабление в период 1991-2016 гг.

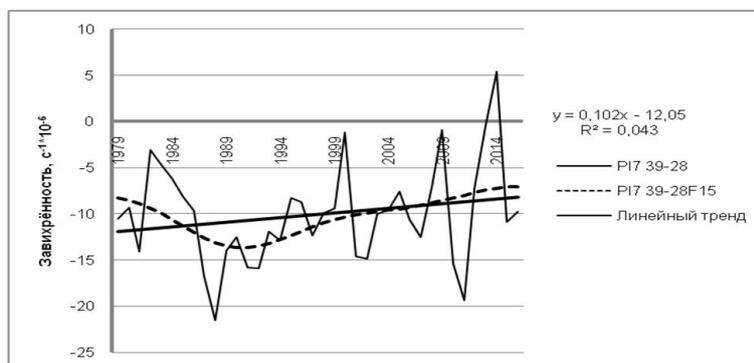


Рис. 4. Многолетний ход завихрённости в январе в Азорском максимуме на изобарической поверхности 850 гПа

**Заключение.** Получены оценки режима макрозавихрённости и её изменений в нижней половине тропосферы Атлантико-Европейского сектора Северного полушария в период 1979-2016 гг. в январе и июле.

Установлено, что в зимний период лучше выражены минимумы геопотенциала, а в летний период – максимумы. Также выявлено, что летом завихрённость в тропосфере гораздо слабее, чем зимой.

С использованием данных реанализа отмечено общее ослабление завихрённости в данном секторе как повсеместно, так и в центрах действия атмосферы и выявлено, что процесс усиления завихрённости наблюдается лишь в январе в районе Исландского минимума, то есть усиление положительной завихрённости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 18-05-00721 и 18-45-160006).

### Список литературы

1. Акперов М.Г., Мохов И.И. Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 620-637.
2. Акперов М.Г., Мохов И.И. Оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внетропических широт к изменению температурного режима // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 2. С. 129-136.
3. Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды [Электронный ресурс]: официальный сайт. Рединг, 2016. URL: <https://www.ecmwf.int> (дата обращения: 17.02.2020).
4. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов: основные методы. М.: Мир. 1982. 428 с.