
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА СВЯЗИ
АРКТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ (АО) И ОСАДКОВ ХОЛОДНОГО СЕЗОНА
НА ТЕРРИТОРИИ БОЛЬШОГО ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА (БВБ)**

© 2013 г. Н. Н. Безуглова^{1*}, Ю. А. Суковатов², К. Ю. Суковатов¹

¹ *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул*

² *Алтайский государственный университет, Барнаул*

*E-mail: bezuglovan@gmail.com

Поступила в редакцию 23.01.2013 г.

Работа посвящена использованию методов спектрального анализа (метода Уэлча) и вейвлет-преобразований для обработки временных рядов геофизических параметров, полученных с помощью данных спутниковых и наземных наблюдений (архивы Monthly Willmott and Matsuura Global Precipitation и данные Global Precipitation Climatology Project). Установлено, что периодическая составляющая ряда осадков холодного сезона на территории Большого Васюганского болота в значительной степени зависит от колебаний индекса Арктической осцилляции. Определены общие периоды колебаний в исследуемых рядах – 2–3 года, 8, 12 лет, а также фазовые соотношения.

Ключевые слова: данные GPCP, Арктическое колебание (АО), спектральный анализ (метод Уэлча), вейвлет-преобразования, Большое Васюганское болото (БВБ).

DOI: 10.7868/S0205961413040015

ВВЕДЕНИЕ

В рамках программы исследования глобального климата (WCRP) был инициирован проект Global Precipitation Climatology Project (GPCP) для количественной оценки распределения осадков по земному шару за большие промежутки времени. На основе спутниковых измерений при участии международной группы экспертов созданы комбинированные ряды месячных, пентадных и ежедневных осадков. Определение атмосферных осадков с помощью дистанционного зондирования (ДЗ) основано на поглощении излучения на определенных длинах волн в микроволновом (МКВ) диапазоне электромагнитного спектра. Дискретность наблюдений при использовании дистанционных методов, как правило, составляет один раз в сутки. Спутниковые данные по осадкам в ИК-диапазоне были получены с помощью космических аппаратов (КА) серий GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite, США), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, США), GMS (Geostationary Meteorological Satellite, Япония).

Анализ данных об изменении климата опирается на результаты непосредственных приземных наблюдений за метеорологическими величинами. Поэтому в современных условиях, с развитием научных и прикладных исследований в области формирования и изменения климата, большое значение приобретают надежность и достоверность вре-

менных климатологических рядов, в частности, рядов количества атмосферных осадков. Для восстановления климатологической однородности временных рядов осадков необходимо исключить влияние систематических погрешностей осадкомерных приборов, изменения методик выполнения измерений, числа сроков наблюдений в сутки, а также изменение во времени условий местоположения приборов.

Эта задача была выполнена в рамках GPCP путем объединения массивов спутниковых данных об атмосферных осадках, полученных в ИК- и МКВ-диапазонах с массивами данных наземных наблюдений от более чем 6000 метеорологических станций. Выбранный разработчиками проекта подход обеспечил доступность больших массивов данных для любого региона планеты и однородность форматов данных, что отвечает современным требованиям практического использования данных. Полученные в рамках GPCP данные были использованы для валидации моделей общей циркуляции атмосферы, на которых основаны системы реанализа NCEP/NCAR и ECMWF. Наборы данных GPCP на настоящий момент представляют собой наиболее полные массивы данных, которые могут использоваться для изучения изменений пространственно-временного распределения атмосферных осадков как в региональном, так и в глобальном масштабах.

Макроциркуляционные процессы являются одним из основных факторов, влияющих на формирование климата на планете в целом и отдельных ее регионов в частности. Атмосферная циркуляция в значительной степени определяет режим увлажнения определенной территории (Бардин, Полонский, 2005; Нестеров, 2003; Кабанов, 2000, 2008; Ипполитов и др., 2005). Одним из основных параметров, характеризующих изменения климата в Северном полушарии, является индекс Арктического колебания (АО). Он отражает массообмен атмосферного воздуха между Арктикой и средними широтами, характеризует преобладание влияния на внутриконтинентальные территории широтного или меридионального переноса воздушных масс.

В работах (Jevrejeva et al., 2004; Grinsted et al., 2004) установлена связь АО и ледовых условий арктических морей и Балтийского моря. В ряде работ показано влияние АО и связанного с ним Северо-Атлантического колебания (NAO) на климатические изменения Западной Сибири (Frey, Smith, 2003; Кабанов, 2008; Безуглова и др., 2009).

В настоящей работе выполнен анализ связи Арктического колебания и осадков холодного сезона на территории Большого Васюганского болота (БВБ), фазовых соотношений их временных рядов для установления возможных связей. БВБ — одно из самых больших болот в мире, расположенное в Западной Сибири, в междуречье Оби и Иртыша, на территории Васюганской равнины. БВБ — это природный феномен, не имеющий аналогов в мире. Рассматриваемая территория находится внутри континента и подвержена как влиянию воздушных масс, перемещающихся из Атлантики (при преобладании широтного переноса), так и влиянию арктических воздушных масс (при преобладании меридиональных атмосферных процессов).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Авторами выполнен анализ временных рядов индекса АО и количества осадков зимнего сезона, полученных с помощью наземных (архив Monthly Willmott and Matsuura Global Precipitation) и спутниковых данных (Global Precipitation Climatology Project) для территории БВБ, ограниченной координатами 57° – 60° с.ш., 76° – 82° в.д. Были использованы данные о месячных суммах осадков за период 1950–2008 гг. (www.disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni). Среднемесячные значения индексов циркуляции можно найти на сайтах (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>; <http://jisao.washington.edu/pdo/>).

МЕТОДЫ

Анализ рядов количества осадков и индекса АО выполнялся с помощью методов корреляци-

онного и спектрального анализа — непараметрического метода Уэлча (основанного на преобразовании Фурье) и вейвлет-преобразования.

Метод Уэлча — один из методов оценки спектра мощности временных рядов с помощью преобразования Фурье, в котором применяются весовые функции и производится разбиение сигнала на перекрывающиеся фрагменты. Применение весовой функции позволяет ослабить растекание спектра и уменьшить смещение получаемой оценки спектра мощности ценой незначительного ухудшения разрешающей способности. Благодаря перекрыванию в методе Уэлча используется больше сегментов, поэтому дисперсия оценки спектра мощности оказывается меньше, чем у ранее используемых методов (Марпл-мл., 1990).

Метод Фурье позволяет определить периодические составляющие временного ряда, однако не может показать эволюцию этих составляющих со временем. В отличие от традиционно применяемого для анализа сигналов преобразования Фурье, вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом масштабы и время рассматриваются как независимые переменные. В результате появляется возможность анализировать свойства сигнала одновременно по времени и в частотном пространстве. Доверительные пределы для вейвлет-спектра были получены (Torgence, Compo, 1998), доверительные пределы для вейвлет-когерентности — в работе (Grinsted et al., 2004).

Вейвлет-преобразование позволяет выявить колебания с большими значениями амплитуд на определенных временных отрезках. Кросс-вейвлет и вейвлет-когерентность позволяют анализировать два физических явления, изменения в которых должны быть связаны с точки зрения климатической системы. Кросс-вейвлет позволяет выявить области с большими значениями величины $|W_n^{XY}(s)|$ и характеризует степень взаимосвязи двух временных рядов (Torgence, Compo, 1998)

$$|W_n^{XY}(s)| = |W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)|, \quad (1)$$

где $|W_n^{XY}(s)|$ — кросс-вейвлет мощность; $W_n^X(s)$, $W_n^Y(s)$ — вейвлет-преобразования двух рядов; $W_n^{Y*}(s)$ — комплексно-сопряженная величина $W_n^Y(s)$. Вейвлет-когерентность показывает наличие когерентных колебаний исследуемых процессов, причем амплитуды их могут быть невелики. Таким образом, эти методы могут быть использованы для установления возможных физических механизмов связи между исследуемыми явлениями.

В работе используется вейвлет Морле (2) с параметром $\omega_0 = 6$, для которого оптимальны разре-

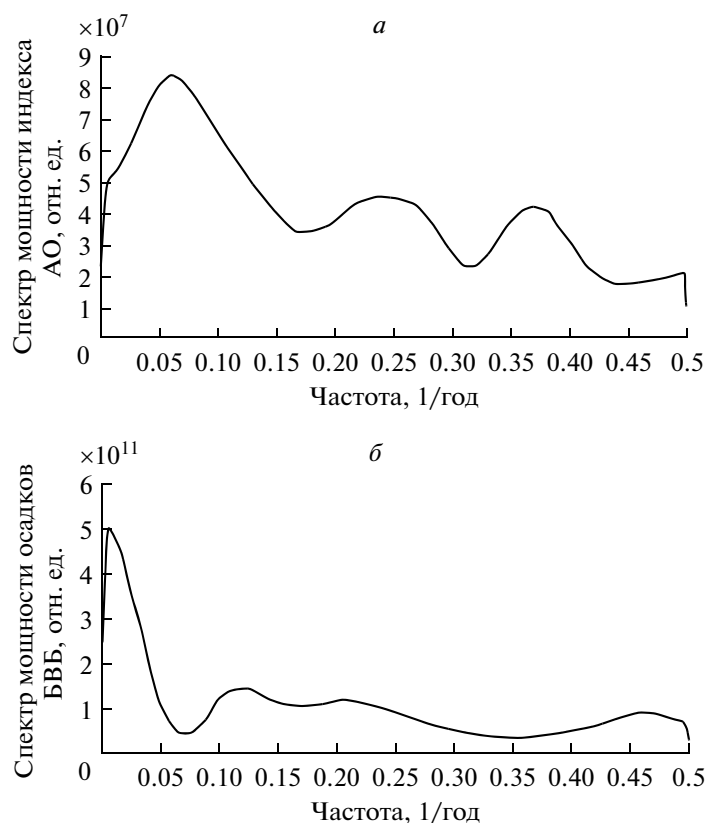


Рис. 1. Спектральные плотности мощности: а – индекса АО; б – осадков на территории БВБ для холодного сезона.

нения по временным масштабам и по времени (временному сдвигу)

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-1/2\eta^2}, \quad (2)$$

где ω_0 – безразмерная частота, η – безразмерное время.

Кроме этого, при использовании данного вейвлета, периоды совпадают с масштабами вейвлет-преобразования, что очень удобно. На рис. 2–4 по вертикальной оси отложены периоды в годах, по горизонтальной – сдвиг по времени в годах. Для расчетов вейвлет-преобразования использовались программы, которые находятся в свободном доступе в сети (Grinsted et al., 2004). Толстыми линиями на рис. 2–4 обозначен 95%-доверительный предел по мощности сигнала, в предположении, что фоновым сигналом является красный шум, т.е. с вероятностью 95% наблюдаемый максимум не принадлежит шуму, значит, представляет собой детерминированные колебания. В отличие от белого шума, мощность которого постоянна на разных частотах, мощность красного шума возрастает на низких частотах. Красный шум может быть получен из белого шума с помощью авторегрессии порядка 1. Многие геофизические временные ряды могут быть смоделированы с помощью белого или красного шума (Torrence, Compo, 1998). Есть осно-

вания полагать, что оценки доверительных пределов, определяемые при обычной методике расчета вейвлет-преобразования (Torrence, Compo, 1998; Grinsted et al., 2004), являются завышенными, но этот вопрос заслуживает отдельного рассмотрения. Для тестирования метода (Grinsted et al., 2004) задавался сигнал в виде синусоиды с заданными периодами с добавлением белого шума. Построенное вейвлет-преобразование тестового сигнала показало хорошую точность этого метода.

Вейвлет-когерентность двух временных рядов определяется следующим образом (Torrence, Webster, 1999):

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2)S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)}.$$

Здесь в числителе стоит кросс-вейвлет-спектр сигналов, в знаменателе – произведение вейвлет-спектров мощности каждого из них, S – усредняющий оператор (Grinsted et al., 2004). Это выражение напоминает обычный коэффициент корреляции двух сигналов, поэтому полезно представлять вейвлет-когерентность как локализованный коэффициент корреляции в частотно-временном пространстве. Для тестирования метода вычисления вейвлет-когерентности задавались синусоидаль-

ные сигналы с различными взаимными сдвигами по фазе от 0 до 2π . Тестирование показало хорошую точность программы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Корреляционный анализ исследуемых рядов для холодного (ноябрь–март) сезона показал наличие значимой корреляции между исследуемыми рядами ($R = 0.39$, уровень значимости $p < 0.05$).

Для выявления скрытых периодичностей в рядах осадков и индексов атмосферной циркуляции были рассчитаны спектральные мощности плотности указанных рядов с использованием непараметрического метода Уэлча.

На рис. 1а,б представлены спектральные плотности мощности индекса АО и осадков на территории БВБ для холодного сезона. Из графиков видно, что в холодный сезон периоды колебаний индекса АО составляют 12–20 и 2–5 лет, а осадков на территории БВБ – 8–12 и 2–5 лет.

В качестве примера двух физических явлений, изменения в которых должны быть связаны с точки зрения климатической системы, рассматриваем средние за зимний сезон значения индекса циркуляции АО, а также количество осадков на территории БВБ с использованием вейвлет-преобразования, кросс-вейвлет и вейвлет-когерентности.

На рис. 2 приведены непрерывные вейвлет-преобразования временных рядов АО и осадков на территории БВБ за зимний сезон. Тонкой линией отмечен конус доверия, за пределами которого краевые эффекты искажают картину преобразования. Краевой эффект появляется за счет конечной длины вейвлетов, поэтому на больших масштабах конус доверия вейвлет-преобразования существенно уменьшается. На графике АО видны сильные колебания с периодами в два–три года на временном интервале 1995–2005 гг. Кроме того, отмечаются усиление колебания с периодами около четырех лет, примерно с 1965 по 1975 гг., хотя их мощность не превышает 95%-доверительный предел. Наблюдаются также усиление колебания с периодами около восьми лет, происшедшие с 1970 по 1995 гг., их мощность также не превышает доверительный предел. Нижняя часть вейвлет-спектра показывает, что, возможно, существуют колебания с периодами более 16 лет, для их определения недостаточно имеющейся длины ряда. Указанные периоды колебаний соответствуют рассчитанным с помощью метода Уэлча. На графике осадков на территории БВБ максимум с периодом около четырех лет располагается на интервале примерно с 1977 по 1983 гг. Максимум два–три года наблюдается с 2000 по 2008 гг. на границе конуса доверия. Слабый максимум около восьми лет наблюдается примерно с

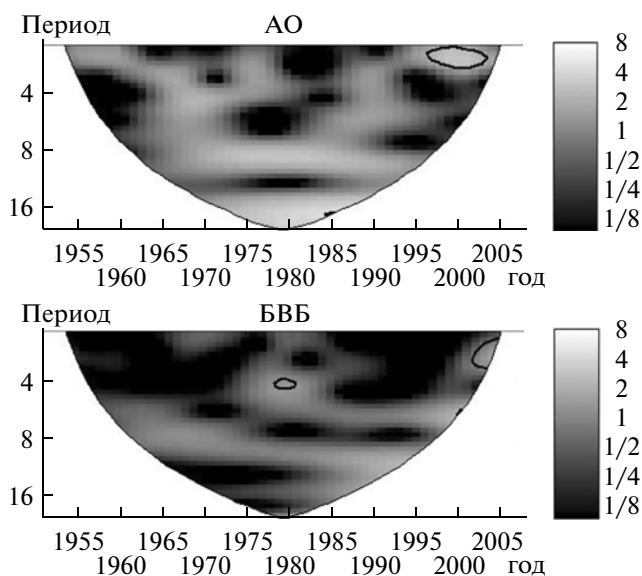


Рис. 2. Вейвлет-преобразования рядов АО и осадков БВБ для холодного сезона.

1965 по 1995 гг. Максимумы, аналогичные максимумам АО, на графике отсутствуют, но они отличаются по мощности и сдвинуты по времени.

Для уточнения картины связи процессов полезно рассчитать их кросс-вейвлет-спектр и вейвлет-когерентность (Grinsted et al., 2004). На рис. 3 представлены графики вейвлет-когерентности исследуемых временных рядов. Толстой линией обозначены области, где коэффициент когерентности превышает 95%-доверительный предел.

В интервале 1987–1994 гг. наблюдается статистически значимая область когерентных изменений сигналов с периодами два–три года. Сигналы находятся скорее в фазе (направление стрелок), точнее, БВБ отстает по фазе от АО на $\pi/4$. По времени отставание колебаний осадков на БВБ от колебаний АО составляет около трех месяцев. Более слабая область когерентного изменения сигналов с периодом около трех лет находится в интервале 1975–1982 гг. Здесь значение коэффициента когерентности не достигает 5%-ного уровня значимости. В области периодов около 10–12 лет видна большая статистически значимая область когерентного изменения сигналов в интервале 1965–1990 гг. На временном отрезке 1965–1980 гг. изменения осадков на БВБ опережают колебания АО на $\pi/4$, т.е. на 1.5 года. После 1980 г. наблюдается когерентное изменение сигналов. Отличия в фазовых соотношениях одних и тех же сигналов для периодов два–три года и 12 лет на временном отрезке 1965–1980 гг. предположительно вызваны разными механизмами распространения сигнала от полярных широт к умеренным.

На рис. 4 приведен график кросс-вейвлет-преобразования рассматриваемых сигналов. Из гра-

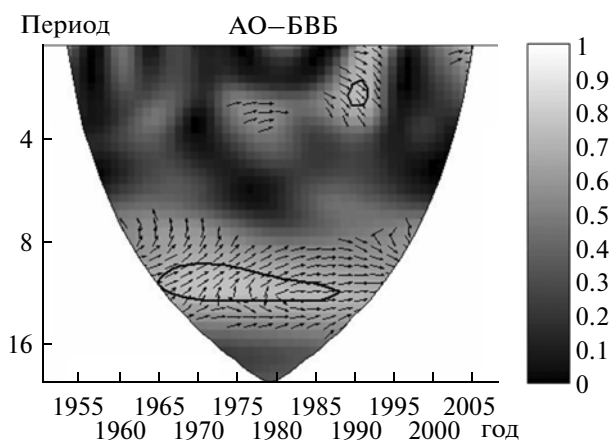


Рис. 3. Вейвлет-когерентности временных рядов индекса АО и осадков БВБ для холодного сезона.

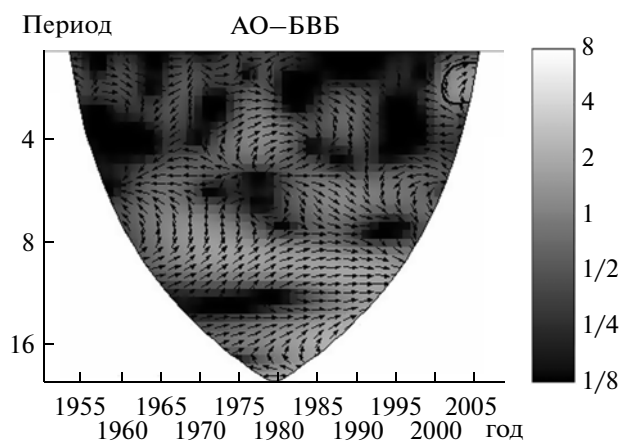


Рис. 4. Кросс-вейвлет рядов индекса АО и осадков БВБ для холодного сезона.

фика видно, что в максимум кросс-вейвлет спектра соответствует периодам 8–12 лет, процессы в этой области находятся скорее в фазе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование комбинированных массивов данных, состоящих из спутниковых данных, полученных в ИК- и МКВ-диапазонах, а также данных широкой сети станций наземных наблюдений позволяет исследовать связи между характеристиками климатической системы в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Применение методов спектрального, кросс-вейвлет анализа и анализа вейвлет-когерентности позволило установить, что периодическая составляющая ряда осадков холодного сезона на территории БВБ в значительной степени зависит от колебаний индекса АО. В интервале 1987–1994 гг. наблюдается статистически значимая область когерентных изменений сигналов с периодами два–три года, причем отставание колебаний зимних осадков на БВБ от колебаний АО составляет около трех месяцев. В области периодов около 12 лет видна большая статистически значимая область когерентного изменения сигналов в интервале 1965–1990 гг. На временном отрезке 1965–1980 гг. изменения осадков на БВБ опережают колебания АО на $\pi/4$, т.е. на полтора года. После 1980 г. наблюдается когерентное изменение сигналов. Отличия в фазовых соотношениях одних и тех же сигналов для периодов два–три года и 12 лет на временном отрезке 1965–1980 гг. предположительно вызваны разными механизмами распространения сигнала от полярных широт к умеренным. Возможно, подтверждается предположение, сделанное в работе (Jevreeva et al., 2004), что атмосферные колебания с периодами 2.2, 3.5, 5.7 года, которые проявляются в Арктике, тремя месяцами ранее генерируются в тропической части Тихого океана и распространяются на

восток (индекс циркуляции SOI). Колебания с периодами более 12 лет генерируются в западной части Тихого океана, их влияние на Арктику проявляется через 1.8–2.1 года за счет более сложных условий распространения.

Работа выполнена в рамках Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 69 “Интегрированные исследования климатических, гидрологических и экосистемных процессов на территории болот Западной Сибири”.

Работа одного из авторов (Суковатова Ю.А.) выполнена при частичной поддержке Программы стратегического развития Алтайского государственного университета (НОК-2, подпроект 2.1.2.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бардин М.Ю., Полонский А.Б. Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 2. С. 3–13.
- Безуглова Н.Н., Зинченко Г.С., Суковатов Ю.А. Периодичность многолетних рядов приземных температур и некоторых индексов циркуляции атмосферы на юге Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 22–24.
- Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 280 с.
- Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Закономерности современных природно-климатических изменений в Сибири: периодичность приземных температур, давления и некоторых геофизических индексов // География и природные ресурсы. 2005. № 3. С. 13–20.
- Кабанов М.В. Природно-климатические изменения. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 4 / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: МГП РАСКО, 2000. 270 с.

- Кабанов М.В.* Некоторые закономерности климатических и экосистемных изменений в Сибири // Журн. СФУ. Биология. 2008. Т. 1. № 4. P. 312–322.
- Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 265 с.
- Нестеров Е.С.* О фазах североатлантического колебания // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 64–74.
- Frey K.E., Smith L.C.* Recent temperature and precipitation increase in West Siberia and their association with Arctic Oscillation // Polar Res. 2003. V. 22. № 2. P. 287–300.
- Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlin. Proc. Geophys. 2004. V. 11. P. 561–566.
- Jevrejeva S., Moore J.C., Grinsted A.* Oceanic and atmospheric transport of multiyear El Niño–Southern Oscillation (ENSO) signatures to the polar regions // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. № L24210. doi: 10.1029/2004GL020871.
- Schweiger A.J.* Changes in seasonal cloud cover over the Arctic seas from satellite and surface observations // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. P. 2207.
- Steele M., Ermold W.* Salinity trends on the East Siberian shelves // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. L24308. doi: 10.1029/2004GL021302.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M.* The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. № 9. P. 1297–1300. doi: 10.1029/98GL00950.
- Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. P. 61–78.
- Torrence C., Webster P.* Interdecadal changes in the ENSO–Monsoon System // J. Clim. 1999. V. 12. P. 2679–2690.

Analysis of Arctic Oscillation (AO) and the Cold Season Precipitation at the Territory of the Bolshoe Vasuganskoe Boloto (BVB) Using Satellite data

N. N. Bezuglova¹, Yu. A. Sukovatov², K. Yu. Sukovatov¹

¹ Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul

² Altai State University, Barnaul

The work is devoted to the methods of spectral analysis (Welch's method) and wavelet transforms for processing time series of geophysical parameters derived using data from satellite (GPCP Project) and ground-based observations (Monthly Willmott and Matsuura Global Precipitation Files). It is found that the periodic component of cold season precipitation in the BVB is largely dependent on the oscillations of the index AO. The common oscillation periods in the test series (2–3, 8, 12 years), and phase relationships are determined.

Keywords: GPCP data, Arctic oscillation (AO), spectral analysis (Welch's method), wavelet transforms, Bolshoe Vasuganskoe boloto