

Влияние пространственной изменчивости температуры поверхности океана на поле ветра

Т.И. Клещёва¹, М.С. Пермяков^{1,2}

¹ Учреждение Российской академии наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильинчева ДВО РАН,
690041, Владивосток, Балтийская, 43
² Дальневосточный федеральный университет,
690950, Владивосток, Суханова, 8,
e-mails: tit@poi.dvo.ru; permyakov@poi.dvo.ru

В работе представлены и обсуждаются результаты изучения связей аномалий температуры поверхности океана (ТПО) и приводного ветра с использованием данных дистанционного зондирования. При этом использовались данные радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E) и скаттерометра SeaWinds со спутника QuikSCAT (SeaWinds/QuikSCAT) за 2006–2009 гг. для районов с экстремальными значениями аномалий температуры поверхности — банки Кашеварова в Охотском море и температурного «следа» тайфуна Ioke (TY0612) в северо-западной части Тихого океана. Показано, что связь аномалий температуры и приводного ветра близка к линейной с высокими коэффициентами корреляции. Отмечаются различия в характеристиках связи аномалий в средних широтах и субтропиках. Графики зависимости возмущений скорости ветра от аномалий ТПО при движении воздуха над холодными пятнами образуют петли, демонстрируя влияние стратификации приводного слоя воздуха на приводный ветер.

Ключевые слова: температура поверхности океана, приводный ветер, дистанционное зондирование, радиометр, скаттерометр, пограничный слой атмосферы.

Введение

Важной современной задачей океанологии и метеорологии остается оценка характеристик взаимодействия приповерхностных пограничных слоев атмосферы и океана. К настоящему времени большинство схем расчета энерго-массообмена океана и атмосферы основываются на теории подобия Монина — Обухова (Монин, Зилитинкевич, 1971), справедливой для стационарных и горизонтально однородных условий. Развитие схем с учетом влияния горизонтальной неоднородности, например, поля ТПО, проводится включением в компоненты ветра термической составляющей (термического ветра), определяемой горизонтальными градиентами ТПО (Braun, Liu, 1982). Однако соотношения термического ветра получаются из геострофического приближения, так же предполагающего стационарность и однородность. Но они и данные наблюдений по аномалиям ветра и ТПО (Small et al., 2008; O'Neill et al., 2005; Song et al., 2006; Chelton et al., 2007; Nonaka, Xie, 2003) показывают необходимость учета влияния горизонтальных градиентов ТПО на приводный ветер и, как следствие, на потоки тепла (явного и скрытого) и импульса. Сложность процессов в пограничном слое атмосферы над неоднородной поверхностью океана заставляет использовать эмпирический подход для установления связи градиентов ТПО и приводного ветра. Для этого в настоящее время могут быть использованы данные дистанционного зондирования со спутников по ТПО и по приводному ветру, покрывающие практически весь Мировой Океан, а для получения достаточно устойчивых и надежных эмпирических связей (в широком диапазоне условий над океаном и морями) могут быть использованы соображения подобия и полуэмпирический подход (Зилитинкевич, 1970).

Целью настоящей работы является исследование связей аномалий ТПО и приводного ветра на синоптических масштабах для средних и низких географических широт — для района банки Кашеварова в Охотском море и в районе холодного следа тайфуна в субтропиках.

Данные и методы

Данные

В работе использовались данные по скорости и направлению приводного ветра и ТПО за 2006–2009 гг., доступные на сайте Remote Sensing Systems (<http://www.remss.com>). Вектора ветра получены с помощью скаттерометров SeaWinds со спутника QuikSCAT и приведены к уровню 10 м над морской поверхностью, поля ТПО восстановлены по данным микроволновых радиометров Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E) со спутника Aqua. При этом использовались данные с отдельных спутниковых витков, получаемые дважды в сутки, в узлах географической сетки с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$. Погрешность оценок скорости ветра составляет $\sim 1,7$ м/с, направления ветра $\sim 14^\circ$ (Chelton, Freilich, 2005), ТПО — $\sim 0,4$ °C (Chelton, Wentz, 2005). Выборка проводилась для районов с экстремальными значениями аномалий температуры поверхности — в Охотском море над банкой Кашеварова с координатами $52^\circ 15' - 58^\circ 30'$ N и $140^\circ 30' - 151^\circ 15'$ E (рис. 1a) и в северо-западной части Тихого океана над температурным следом тайфуна Ioke (TY0612) с координатами $10 - 45^\circ$ с.ш. и $140 - 180^\circ$ в.д. (рис. 1б).

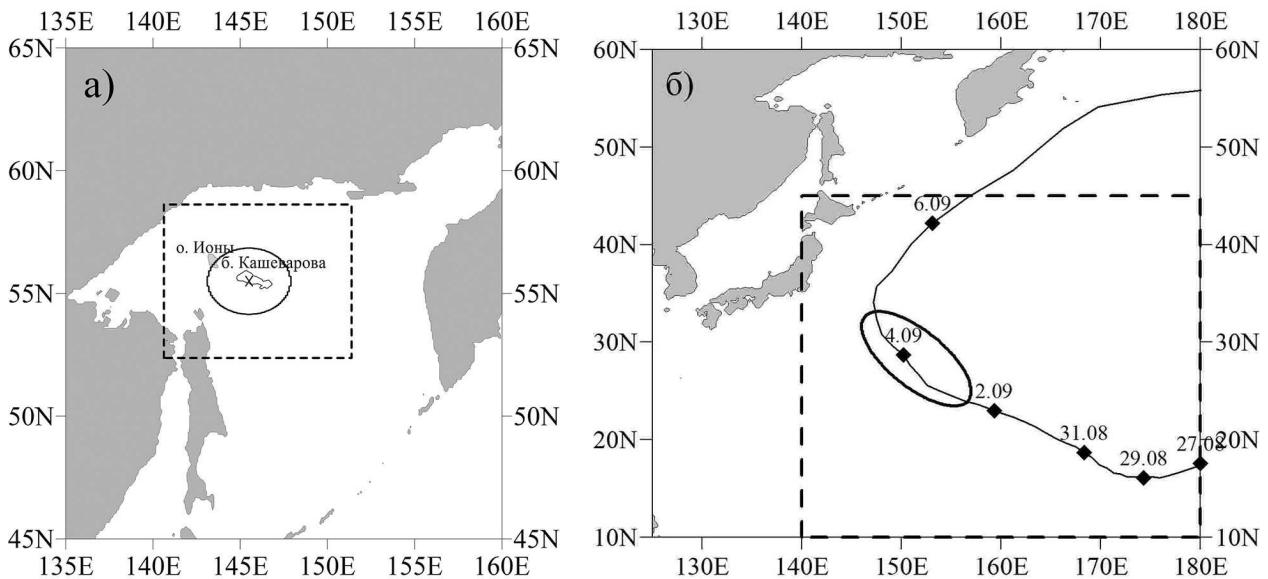


Рис. 1. Районы исследований: а — банка Кашеварова в Охотском море;
б — район прохождения тайфуна Ioke

Методы

Для количественного анализа связи аномалий приводного ветра и ТПО над банкой Кашеварова использовались выборки данных в круговой области радиусом 150 км с центром с координатами $55,5^\circ$ N, $145,5^\circ$ E (см. рис. 1а). Над «следом» тайфуна Ioke выборки данных проводились в эллиптической области с большой и малой осями 700 и 300 км с центром $28,3^\circ$ N, $151,5^\circ$ E (см. рис. 1б). Из этих данных выделялись аномалии ТПО и ветра. Аномальными считались точки данных, в которых отклонения значений ТПО или ветра от фоновых превышали заданную величину. При этом в качестве фоновых использовались значения функции двумерной полиномиальной регрессии третьей степени, построенной методом наименьших квадратов с исключением точек, в которых отклонение от регрессии превышает порог — в нашем случае равный двум среднеквадратичным отклонениям регрессии от данных. Процедура регрессии с селекцией данных повторяется до тех пор, пока среднеквадратичное отклонение от регрессии не перестает изменяться, что исключает влияние значи-

тельных аномалий на фоновые поля ТПО и ветра. Для анализа различия в связях аномалий при натекании воздуха на холодное пятно и стекании с него аномалии выбирались в полосе шириной около 30...50 км, проходящей через центры холодных пятен над банкой Кашеварова и над следом тайфуна в направлении среднего по области ветра. На рис. 2 показан пример такого разделения общего массива аномалий ТПО и ветра на две выборки над «следом» тайфуна Ioke 7 сентября 2006 г.

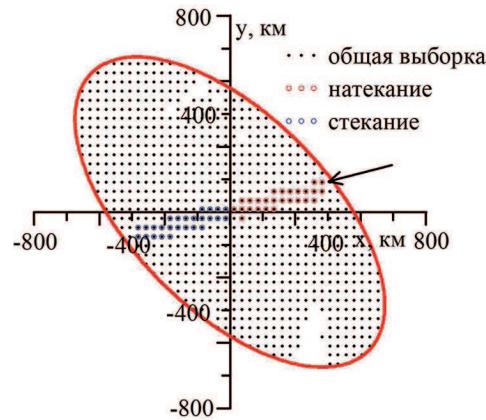


Рис. 2. Пример выборки данных над «следом» тайфуна Ioke 7 сентября 2006 г.
Стрелкой показано направление среднего ветра

Результаты

Как показано в работах (Пермяков, Тархова, 2011; Tarkhova et al., 2011), над банкой Кашеварова в Охотском море в летне-осенний период в результате сильного приливного перемешивания (Kowalik, Polyakov, 1999; Rogachev et al., 2001) формируется область с температурой более низкой по сравнению с окружающей акваторией. Анализ ежедневных спутниковых данных полей приводного ветра QuikSCAT и ТПО AMSR-E показал, что между ними часто возникает существенная корреляция с максимальной повторяемостью в августе – сентябре (38...67 %), и достигающая в отдельные дни ~0,9. Значительное уменьшение скорости и отклонение направления приводного ветра появляются и над температурными аномалиями в «следах» тропических циклонов в верхнем слое океана (Lin et al., 2003; Тархова и др., 2010), хотя их величины меньше, чем над банкой Кашеварова. На рис. 3 (левый столбец) показаны поля приводного ветра над температурным следом тайфуна Ioke, пересекшим выделенную акваторию северо-западной части Тихого океана с 27 августа по 6 сентября 2006 г. Максимальному понижению ТПО на 3,5 °C 7 сентября, по сравнению с невозмущенным полем ТПО 25 августа, соответствовало снижение скорости ветра на 3 м/с. Центральный столбец рис. 3 демонстрирует диаграммы рассеяния аномалий ТПО и скорости ветра в области холодного следа тайфуна, выделенной эллипсом. Значимые корреляции ($r \geq 0,5$) прослеживалась в течение нескольких дней, с максимумом достигающим ~0,7 через день после прохождения тайфуна. Наклон линейной регрессии (*slope*) также претерпевал временной ход, увеличиваясь от 0,5 6 сентября до максимального значения 0,82 7 сентября. Для сравнения на рис. 4 приводятся аналогичные результаты для банки Кашеварова для отдельного витка спутника 29 июля 2006 г. С точки зрения возможного влияния географических условий на связь аномалий ТПО и ветра заметим, что наклон линейной регрессии по данным за 2006–2009 гг. над банкой Кашеварова в средних широтах составляет 0,4 м/с C⁻¹, что значительно меньше, чем в субтропиках. В правых столбцах рис. 3 и 4 показаны диаграммы рассеяния аномалий ТПО и ветра при натекании воздуха на холодную воду и стекании с нее по данным, выбранным в полосе в направлении среднего ветра. Как видно из рисунков, при таком разделении выборок на два массива эмпирические связи различны и явно нелинейные (линии на рисунке — аппроксимация параболами).

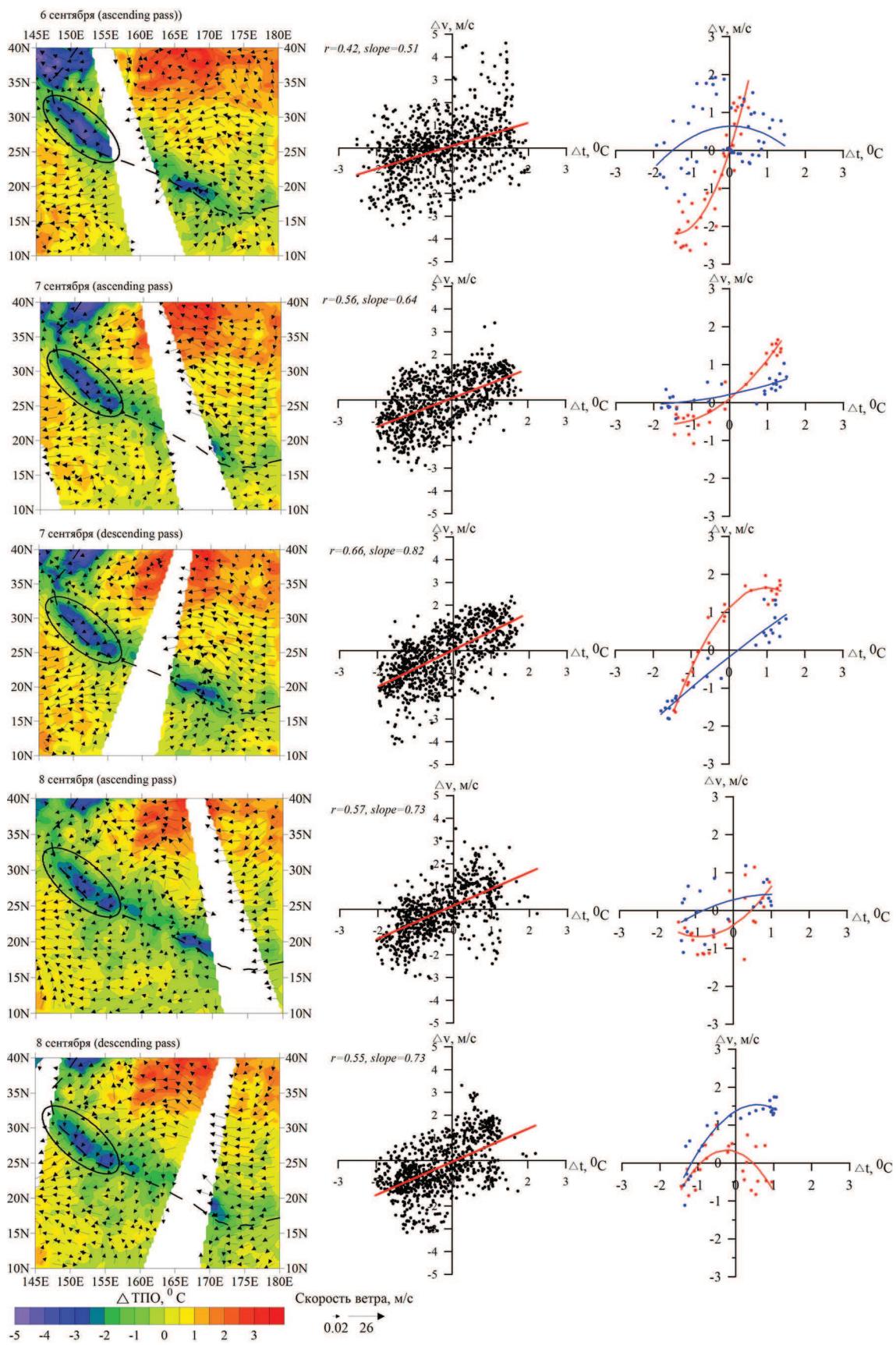


Рис. 3. Поля приводного ветра и аномалий ТПО и диаграммы их рассеяния после прохождения тайфуна *Ioke* 6–8 сентября 2006 г. Слева — поля приводного ветра и аномалий ТПО (ΔTPO), в центре — диаграммы рассеяния аномалий ТПО (Δt) и скорости ветра (Δv) над холодным следом (выделенный черным эллипсом на рисунках в левом столбце), справа — диаграммы рассеяния аномалий ТПО и ветра при натекании воздуха на холодный след (красные точки) и стекании (синие точки) в полосе в направлении среднего ветра.
Красная и синяя линии — регрессия

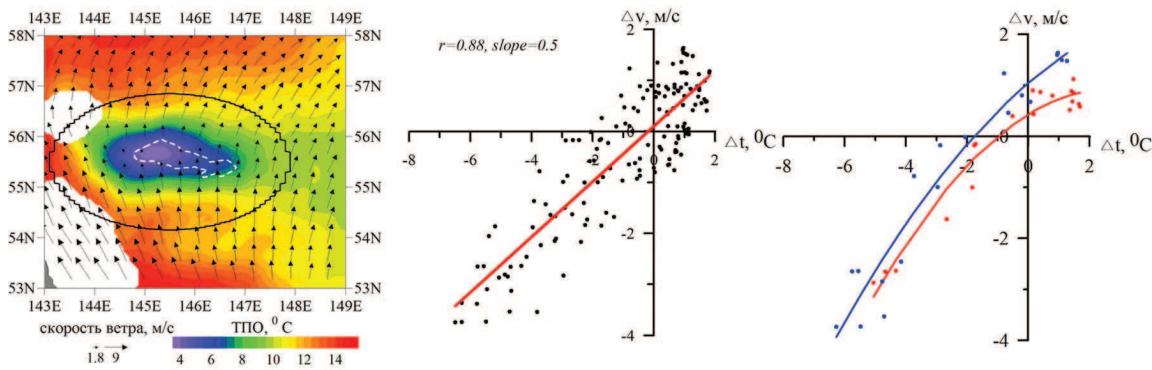


Рис. 4. Поля приводного ветра и ТПО и диаграммы рассеяния их аномалий над банкой Кашеварова 29 июля 2006 г. (см. пояснение к рис. 3)

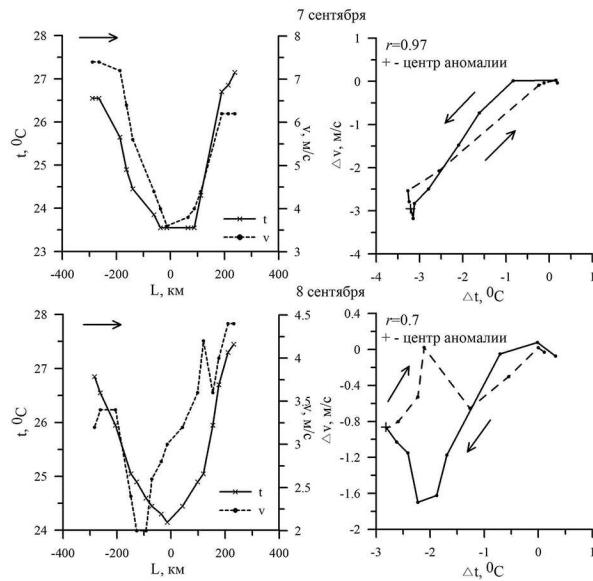


Рис. 5. Изменения скорости ветра и ТПО (слева) и диаграмма рассеяния их аномалий (справа) в полосе, проходящей через центр аномалии в направлении среднего ветра (стрелка), 7 и 8 сентября 2006 г. над следом тайфуна Ioke

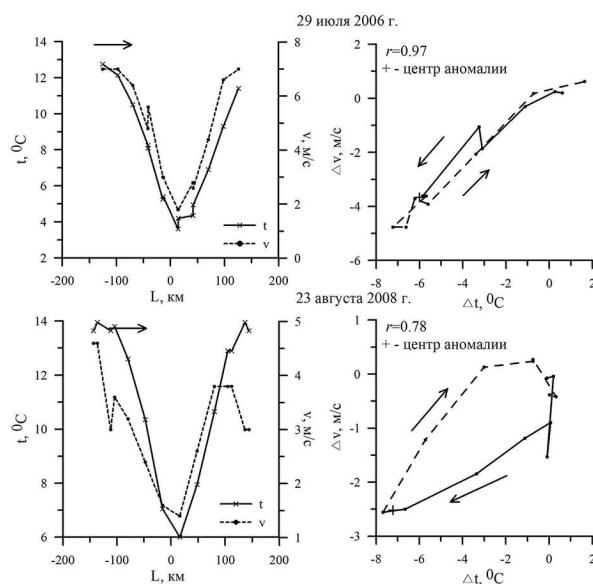


Рис. 6. Изменения скорости ветра и ТПО (слева) и диаграмма рассеяния их аномалий (справа) в полосе, проходящей через центр аномалии в направлении среднего ветра (стрелка), 29 июля 2006 г. и 23 августа 2008 г. над банкой Кашеварова

На рис. 5 и 6 показаны изменения скорости ветра и ТПО и соответствующие им диаграммы рассеяния их аномалий в полосе, проходящей через центры холодных пятен в направлении среднего ветра над следом тайфуна Ioke и банкой Кашеварова. Как видно из рисунков, скорость ветра над холодными аномалиями снижается, корреляция аномалий для данных примеров достигает 0,97. Диаграммы демонстрируют значительное различие в связях аномалий при натекании воздуха на холодное пятно и стекании с него, что может быть связано с изменением в направлении среднего ветра стратификации приводного слоя воздуха. Стратификация приводного слоя атмосферы, связанная с разностью температур вода-воздух, изменяет профиль приводного ветра в нижних нескольких десятках метров при практически неизменном ветре выше, таким образом, что при натекании на холодную воду сдвиг ветра увеличивается, а при стекании на теплую периферию пятна — уменьшается (Samelson et al., 2006).

Упорядоченные по расстоянию вдоль направления среднего ветра точки данных на диаграммах аномалий образуют петли, в которых аномалии ветра и ТПО возрастают при натекании на холодной пятне и релаксируют к нулевым значениям при движении к периферии пятна. Подобные петли в рамках полуэмпирического подхода получены для безразмерных геострофических коэффициентов трения (здесь он аналог аномалии приводного ветра) и устойчивости (здесь ее аналог — аномалия ТПО с противоположным знаком) в условиях периодического режима (суточный ход) в пограничном слое и приводятся в работах (Зилитинкевич, 1970; Монин, Зилитинкевич, 1971). Это указывает на возможность получения устойчивых эмпирических связей с помощью соображений подобия и полуэмпирического подхода к турбулентному пограничному слою. В свою очередь, это требует преобразования величин аномалий и внешних параметров, определяющих процессы в приводном слое атмосферы, в некоторые безразмерные комплексы (Зилитинкевич, 1970). К внешним параметрам обычно относят геострофическую скорость ветра вне пограничного слоя, параметр Кориолиса, параметры статической устойчивости (пропорциональные разности температур вода-воздух) и шероховатости поверхности. Но для спутниковых данных необходимы изменения в определении параметров подобия. Так, параметр статической устойчивости должен быть заменен на параметр, определяемый через аномалии температуры, а геострофический ветер может быть рассчитан по данным реанализа или вместо него можно взять фоновые значения приводного ветра, полученные осреднением на синоптическом масштабе.

Заключение

В настоящей работе по спутниковым данным исследовались связи между аномалиями температуры поверхности океана и приводного ветра в средних и низких географических широтах на синоптических масштабах — над банкой Кашеварова в Охотском море и над холодным «следом» тайфуна Ioke в субтропиках. Показано, наличие сильных, близких к линейным, статистических связей в обоих районах, характеристики которых зависят от широты и фоновых условий. Диаграммы аномалий ТПО и ветра при движении воздуха над холодными пятнами образуют петли, демонстрируя влияние стратификации приводного слоя воздуха на приводный ветер. Полученные результаты показывают возможность получения устойчивых эмпирических связей с помощью соображений подобия и полуэмпирического подхода к турбулентному пограничному слою.

Работа выполнена при поддержке ДВО РАН (проект № 09-III-А-07-333) и РФФИ (проекты № 09-05-00640, № 11-01-12107-офи-м).

Литература

1. Зилитинкевич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л: Гидрометиздат, 1970. 290 с.
2. Монин А.С., Зилитинкевич С.С. Об учете микро- и мезомасштабных явлений в численных моделях атмосферы // Тр. 2-го Токийского симпозиума. Л: Гидрометиздат, 1971. С. 77–78.
3. Пермяков М.С., Тархова Т.И. Аномалии ветра и температуры поверхности над банкой Кашеварова в Охотском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 277–282.
4. Тархова Т.И., Пермяков М.С., Поталова Е.Ю., Семыкин В.И. О связи аномалий приповерхностного ветра с градиентами температуры поверхности океана по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 45–52.
5. Brown R.A., Liu W.T. An operational large-scale marine planetary boundary layer model // J. Applied Meteorology. 1982. V. 21. P. 261–269.
6. Chelton D.B., Freilich M.H. Scatterometer-Based Assessment of 10-m Wind Analyses from the Operational ECMWF and NCEP Numerical Weather Prediction Models // Monthly Weather Rev. 2005. V. 133. P. 409–429.
7. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Summertime coupling between sea surface temperature and wind stress in the California current system // J. Physical Oceanography. 2007. V. 37. P. 495–517.
8. Chelton D.B., Wentz F.J. Global Microwave Satellite Observations of Sea Surface Temperature for Numerical Weather Prediction and Climate Research // Bull. American Meteorological. Soc. 2005. V. 86. P. 1097–1115.
9. Kowalik Z., Polyakov I. Diurnal tides over Kashevarov Bank, Okhotsk sea // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. N. C3. P. 5361–5380.
10. Lin I.I., Liu W.T., Wu C.C., Chiang J.C.H., Sui C.H. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. N. 3. P. 1131.
11. Nonaka M., Xie S.P. Covariations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: evidence for ocean-to-atmosphere feedback // J. Climate. 2003. V. 16. P. 1404–1413.
12. O'Neill L.W., Chelton D.B., Esbensen S.K., Wentz F.J. High-resolution satellite measurements of the atmospheric boundary layer response to SST variations along the Agulhas Return current // J. Climate. 2005. V. 18. P. 2706–2723.
13. Rogachev K.A., Carmack E.C., Salomatin A.S., Alexanina M.G. Lunar fortnightly modulation of tidal mixing near Kashevarov Bank, Sea of Okhotsk, and its impacts on biota and sea ice // Progress in Oceanography. 2001. V. 49. P. 373–390.
14. Samelson R.M., Skillingstad E.D., Chelton D.B., Esbensen S.K., O'Neill L.W., Thum N. On the coupling of wind stress and sea surface temperature// J. Climate. 2006. V. 19. P. 1557–1566.
15. Small R.J., de Szoeke S.P., Xie S.P., O'Neill L., Seo H., Song Q., Cornillon P., Spall M., Minobe S. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2008. V. 45. P. 274–319.
16. Song Q., Cornillon P., Hara T. Surface wind response to oceanic fronts // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. P. C12006.
17. Tarkhova T.I., Permyakov M.S., Potalova E.Yu., Semykin V.I. Sea surface wind perturbations over the Kashevarov Bank of the Okhotsk Sea: a satellite study // Annales de Géophysique. 2011. V. 29. P. 393–399.

The influence of spatial variability of sea surface temperature on wind field

T.I. Kleshcheva¹, M.S. Permyakov^{1,2}

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS,
690041, Vladivostok, Baltiyskaya, 43

² Far Eastern Federal University,
690950, Vladivostok, Sukhanova, 8,
e-mails: tit@poi.dvo.ru, permyakov@poi.dvo.ru

In this paper the results of investigation of the coupling between sea surface temperature (SST) and wind according to remote sensing data are presented. The data of Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E) and scatterometer SeaWinds onboard QuikSCAT satellite (SeaWinds/QuikSCAT) in 2006–2009 years are used for areas with extreme values of sea surface temperature anomalies - the Kashevarov Bank in the Okhotsk Sea and in subtropics of a northwest Pacific in a typhoon Ioke (TY0612) temperature trace. It is shown, that the coupling between anomalies of SST and wind is close to a linear one with high correlation factors. The difference in characteristics of the anomalies coupling in middle and low latitudes are marked. The diagrams of wind perturbations-SST anomalies dependence when air flowing over cold spots form loops, showing the influence of the surface layer air stratification on a sea surface wind.

Keywords: sea surface temperature, wind, remote sensing, radiometer, scatterometer, atmosphere boundary layer.