

## Восстановление температуры воздуха у морской поверхности при холодных вторжениях на примере Берингова моря по данным радиометра AMSU-A

М.К. Пичугин

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН)  
690041, Владивосток, Балтийская, 43  
E-mail: pichugin@poi.dvo.ru*

Определение турбулентных потоков тепла и влаги над акваториями высоких широт становится все более актуальной проблемой. В определении потоков широко используются балк-формулы, входными параметрами которых являются скорость приводного ветра ( $W$ ), температура поверхности воды ( $T_w$ ), температура ( $t_a$ ) и влажность ( $q_a$ ) воздуха у морской поверхности. Погрешности алгоритмов восстановления приводных характеристик по данным спутниковых измерений являются основными источниками ошибок в определении турбулентных потоков. В работе приведено описание регрессионного алгоритма восстановления температуры воздуха в приводном слое атмосферы над Беринговым морем. В основе алгоритма лежит взаимосвязь  $t_a$  с яркостной температурой ( $T_y$ ) на частоте 52,8 ГГц, измеренной микроволновым радиометром AMSU-A со спутников серии NOAA. Моделирование  $T_y$  показало, что взаимосвязь становится более тесной при коррекции  $T_y$  на вклад ветра  $W$  и водозапаса облаков  $Q$ . Коэффициенты регрессии получены из массива сопряженных по пространству и времени спутниковых данных и измерений океанических буев в Беринговом море при холодных вторжениях. Среднеквадратическая погрешность восстановления температуры воздуха для сопряженного массива составила  $\sigma_a = 1,71$  К. Приведен пример применения алгоритма восстановления  $t_a$  при холодном вторжении в Беринговом море. Получены оценки турбулентных потоков явного тепла по данным спутниковых измерений.

**Ключевые слова:** взаимодействие океана и атмосферы, турбулентные потоки тепла, AMSU-A, яркостные температуры, температура воздуха, холодные вторжения, Берингово море.

### Введение

Получение достоверных сведений об обмене теплом, влагой и количеством движения на границе раздела океан–атмосфера является одной из важнейших задач в моделировании атмосферной циркуляции и методах долгосрочного и сверхдолгосрочного прогноза погоды и климата. За последние десять лет существенно возросло внимание к регионам северных широт, где климатические изменения наиболее выражены. Особый интерес представляет организация круглогодичной эксплуатации северного морского пути, в связи с интенсивным таянием льда в Северном Ледовитом океане (СЛО). Не менее актуален вопрос оценки вклада морских и наземных экосистем в региональный баланс количества органического вещества в Арктике, ранее законсервированного в вечной мерзлоте (Shakhova et al., 2010).

Количественные оценки взаимодействия океана и атмосферы в арктических и северных морях немногочисленны (Uttal et al., 2002; Brümmer et al., 2009). Определение турбулентных потоков тепла и влаги затруднено штормовым ветром, низкой температурой воздуха, характерными для полярных циклонов и холодных вторжений, наличием полыней и морского льда на поверхности. Различия в оценках средних турбулентных потоков явного и скрытого тепла над морской поверхностью из массивов данных J-OFURO v2 [<http://dtsv.scc.u-tokai.ac.jp/j-ofuro/>], OAFflux [<http://oafux.who.edu/data.html>], HOAPS-3 [<http://www.hoaps.org/>] и других продуктов, рассчитанных по спутниковым данным, для северных широт существенны, и достигают 50...100 % от величин потоков.

Для определения турбулентных потоков широко используется аэродинамический метод, основанный на полуэмпирических балк-формулах. Входными параметрами, ис-

пользуемыми при параметризации потоков, являются скорость приводного ветра ( $W$ ), температура поверхности воды ( $T_w$ ), температура ( $t_a$ ) и влажность ( $q_a$ ) воздуха у морской поверхности. Регулярные площадные оценки этих параметров могут быть получены по данным дистанционного зондирования. Погрешность восстановления  $t_a$  по данным спутниковых измерений с использованием глобальных алгоритмов (Jones et al., 1999; Jackson et al., 2006; Singh et al., 2005), а также существующих реанализов, достигает 2...3 °С при исследовании мезомасштабных атмосферных процессов зимой, что вызывает заметные ошибки в оценке потоков. Разработка алгоритмов, учитывающих гидрометеорологические особенности исследуемого района в холодный период и их регистрацию дистанционными спутниковыми устройствами, позволит улучшить оценки характеристик атмосферы в приводном слое.

Цель работы заключается в разработке регионального алгоритма восстановления температуры воздуха у морской поверхности ( $t_a$ ) над акваториями высоких широт на примере Берингова моря по данным радиометра Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A), установленного на спутниках серии NOAA, представляющего собой 15-канальный микроволновый радиометр, сканирующий поперек трассы несущего спутника в диапазоне углов обзора  $\pm 48^\circ$  (Goodrum et al., 2000). К изменениям характеристик нижней тропосферы наиболее чувствителен 4 канал, принимающий излучение Земли на частоте  $f = 52,8$  ГГц на вертикальной поляризации (Jackson et al., 2006). В работе исследована взаимосвязь яркостной температуры  $T_y(52,8 \text{ ГГц})$  с  $t_a$  при холодных вторжениях (ХВ), характерных для высоких широт. В лаборатории спутниковой океанологии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева автором был сформирован архив спутниковых и контактных данных по вторжениям, зарегистрированным над дальневосточными морями с 2002 по 2009 г. (Пичугин, Митник, 2009). Для пяти случаев наиболее продолжительных ХВ был построен массив сопряженных по пространству и времени спутниковых данных и измерений океанических буев. На основе собранного материала с использованием результатов моделирования микроволнового излучения был разработан региональный алгоритм восстановления  $t_a$  и применен к определению турбулентных потоков явного тепла над Беринговым морем.

## Моделирование

Для моделирования измерений радиометра AMSU-A и оценки чувствительности  $T_y(52,8 \text{ ГГц})$  к вертикальным профилям температуры воздуха в нижней тропосфере (до 2 км), скорости приводного ветра  $W$ , паросодержания атмосферы  $V$  и водозапаса облаков  $Q$ , были использованы измерения 3170 радиозондов, запущенных с о-вов Св. Павла, Шемья и Уналашка в Беринговом море в холодные периоды (ноябрь–март) 1994–2010 гг. Данные радиозондирования состоят из профилей давления  $P(\text{hi})$ , температуры  $T(\text{hi})$  и относительной влажности атмосферы  $U(\text{hi})$  на нескольких десятках уровней  $i = 1, \dots, n$  до 25...30 км и скорости ветра у поверхности  $W$ . Радиозондовые измерения дополнялись профилями водности облаков с использованием статистических данных о количестве и типах облаков.

Расчет  $T_y$  для этого массива выполнялся путем численного интегрирования уравнения переноса микроволнового излучения в системе океан–атмосфера (Митник, Митник, 2006) для спектра частот (50...54 ГГц) на вертикальной поляризации при зондировании в надир. Из анализа спектра  $T_y$  (рис. 1) видно, что составляющая  $T_y(52,8 \text{ ГГц})$ , обусловленная влиянием температуры нижней тропосферы, может быть выделена только при аккуратном учете вклада скорости приводного ветра и водозапаса облаков. Так, например, при образовании облаков слоистых форм с водозапасом 0,1 кг/м<sup>2</sup>, что типично для ХВ,  $T_y(52,8 \text{ ГГц})$  возрастает приблизительно на 1,4 К.

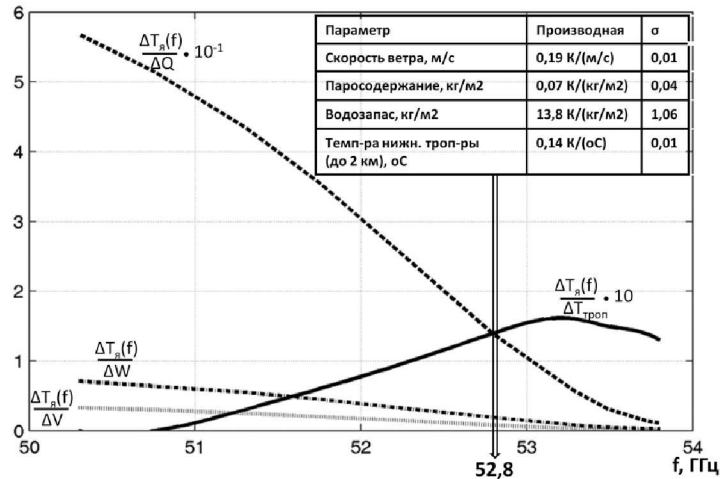


Рис. 1. График производных  $T_y$  (52,8 ГГц) по водозапасу облаков (пунктир) ( $Q$ ); скорости ветра ( $W$ ) (штрих пунктир); паросодержанию ( $V$ ) (штрих); – средней температуре нижней тропосферы (до 2 км) ( $T_{троп}$ ) (сплошная линия) для спектра частот 50...54 ГГц на вертикальной поляризации. Для наглядности производные по  $Q$  и  $T_{троп}$  умножены на 10–1 и 10, соответственно

## Данные

### Спутниковые измерения

В работе использовались данные спутниковых измерений микроволнового радиометра AMSU-A со спутников серии NOAA. AMSU-A принимает излучение Земли на 15 частотных каналах, 12 из которых находятся в полосе поглощения молекулярного кислорода (50...60 ГГц) [<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/pod-guide/ncdc/docs/klm/index.htm>]. Поскольку радиометр зондирует в диапазоне углов обзора  $\theta = \pm 48,33^\circ$ , то с ростом  $\theta$  увеличивается оптическая толщина атмосферы, что приводит к изменениям яркостных температур, все более заметным у края скана. Для минимизации этих изменений к измеренным яркостным температурам  $T_y$  применялась процедура приведения к надиру (Goldberg et al., 2001), а также рассматривались  $T_y$  при  $\theta = 0 - \pm 26,64^\circ$ .

Данные AMSU-A были взяты из национального управления по исследованию океана и атмосферы NOAA посредством системы Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) [<http://www.nsof.class.noaa.gov>]. Для получения яркостных температур уровня level 1d в работе проводилась предварительная обработка исходных данных с использованием пакета программ AAPP [<http://research.metoffice.gov.uk/research/interproj/nwpsaf/aapp/>].

Также в разработке алгоритма и анализе характеристик холодного вторжения использовались поля ветра, паросодержания атмосферы и водозапаса облаков, восстановленных из измерений микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua [[ftp://suzaku.eorc.jaxa.jp/pub/AMSR/private/PI\\_directory/PML1/](ftp://suzaku.eorc.jaxa.jp/pub/AMSR/private/PI_directory/PML1/)] с использованием алгоритмов (Митник, Митник, 2011; Bobyl'ov et al., 2010), и полученных по данным радиометра SSM/I со спутников F-13–17 [<ftp://ftp.ssmi.com/ssmi/>].

### Сопряженный массив данных

Для исследования взаимосвязи температуры воздуха у морской поверхности с  $T_y$  (52,8 ГГц) выбрано пять случаев наиболее продолжительных ХВ над Беринговым морем, для которых был сформирован массив сопряженных по пространству и времени данных. Массив содержит значения  $T_y$  (52,8 ГГц) по измерениям AMSU-A со спутников NOAA-15, -16, -18 и МЕТОР-А, водозапаса облаков  $Q$ , скорости приводного ветра  $W$  и паросодержания

атмосферы  $V$ , восстановленные по измерениям радиометров SSM/I со спутников F-16, -17 Министерства обороны США и AMSR-E со спутника Aqua, и температуры воздуха у морской поверхности по данным сети океанических буев. Также массив был дополнен значениями среднесуточной температуры поверхности воды (Reynolds et al., 2007), взятыми из [ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/OI-daily-v2/]. Общая блок-схема сопряжения данных представлена на рис. 2.

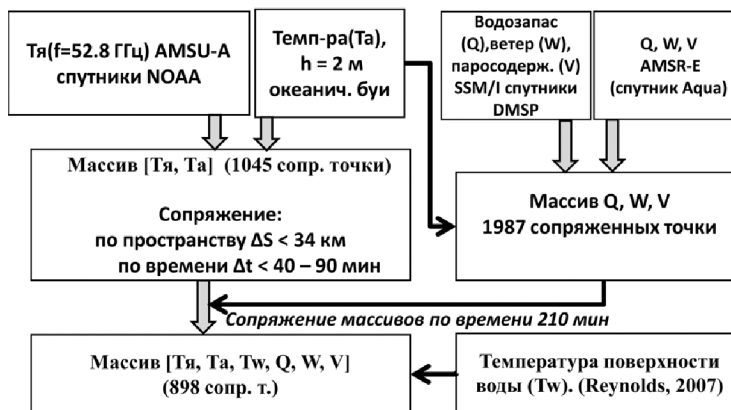


Рис. 2. Общая блок-схема пространственно-временного сопряжения спутниковых данных и измерений океанических буев

## Алгоритм и его применение

### Описание алгоритма

В основе алгоритма лежит тесная взаимосвязь яркостной температуры  $T_y$  на частоте 52,8 ГГц с температурой воздуха у морской поверхности  $t_a$  (Jackson et al., 2006). В данной работе на основе моделирования введена коррекция  $T_y$  на вклад ветра  $W$  и водозапаса облаков  $Q$ , влияние которых для северных широт остается существенным (Пичугин, 2011). Так, при учете  $Q$  и  $W$  корреляция между  $T_y$  и  $t_a$  возрастает (рис. 3). Также в алгоритм включены температура поверхности воды и паросодержание атмосферы, косвенно связанные с определяемым параметром. Температура воздуха находится по множественной регрессии:

$$t'_a = A_1 \log_{10}(T_{52,8} - \Delta T_y) + A_2 \log_{10}(V) + A_3 \log_{10}(t_w) + A_4,$$

где  $T_{52,8}$  — яркостная температура на частоте 52,8 ГГц (К);  $\Delta T_y = a_1 Q + a_2 W$  — вклад в  $T_{52,8}$ , обусловленный действием ветра (м/с) и содержанием капельной влаги в облаках (кг/м<sup>2</sup>).

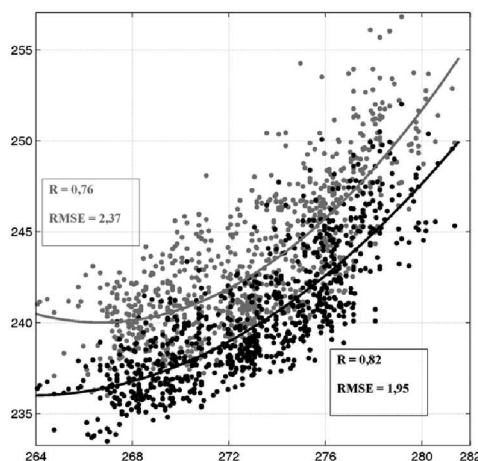


Рис. 3. Взаимосвязь температуры воздуха у морской поверхности с яркостной температурой  $T_y$  на частоте 52,8 ГГц без коррекции (серый цвет) и с коррекцией (черный цвет) на вклад ветра и водозапаса облаков

Коэффициенты  $a_1 = 13,8$  и  $a_2 = 0,19$  определяются значениями производных  $T_{\text{я}}$  (52,8 ГГц) по  $Q$  и  $W$ , соответственно (см. рис. 1);  $t_w$  — температура поверхности воды, взятая из массива (Reynolds et al., 2007) (К). Для сопряженного массива были найдены значения коэффициентов в регрессии:  $A_1 = 203,833$ ;  $A_2 = 6,976$ ;  $A_3 = 383,509$ ;  $A_4 = -1154,329$ . Дополнительно вводится коррекция на нелинейность зависимости восстановленной температуры воздуха от измеренной  $t_a = t'_a + \Delta t_a$ , где  $\Delta t_a = 0,533t'_a - 145$  — полученная эмпирически поправка, которая вводится для  $t'_a \leq 274$  К. Среднеквадратическая погрешность восстановления температуры воздуха для сопряженного массива составила  $\sigma_{ta} = 1,71$  К (рис. 4).

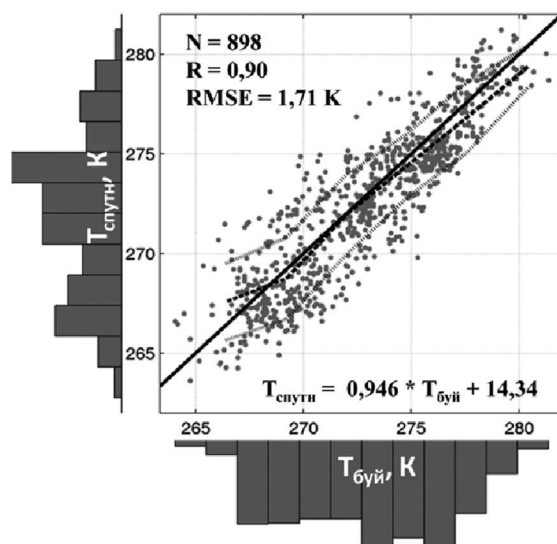


Рис. 4. Диаграмма рассеяния с математическим ожиданием (пунктирная линия) и дисперсией (точечные линии) для температуры воздуха у морской поверхности, измеренной океаническими буями, и рассчитанной по алгоритму. По осям приведены гистограммы соответствующих величин

### Холодное вторжение над Беринговым морем

Регрессионный алгоритм восстановления температуры воздуха у морской поверхности был использован при проведении комплексного анализа холодного вторжения над Беринговым морем. Вторжение регистрировалось с 5 по 8 марта 2010 г. по характерным конвективным облачным грядам и ячейкам на видимых изображениях, полученных спектрорадиометром MODIS со спутников Aqua и Terra. В течение интенсивной стадии вторжения над большей частью моря скорость приводного ветра превышала 10 м/с, достигая максимальных значений (18...20 м/с) в полосе сильных ветров, вытянутой вдоль западной части Алеутских островов. В заключительной стадии вторжения сформировалась серия атмосферных мезоциклонов различных размеров, распространившихся от Чукотки вдоль основного потока вторжения (рис. 5). Температура воздуха у поверхности над Беринговым морем, найденная по регрессионному алгоритму, возрастает от  $-9...-8$ , у кромки льда, до  $-1...0$  °С, в центральной части Алеутских островов, и хорошо согласуется с показаниями океанических буев (рис. 6а). Поле турбулентного потока явного тепла ( $S$ ) над Беринговым морем рассчитано с использованием балк-формулы (Fairall et al., 2003) в период близких по времени измерений радиометров AMSU-A и AMSR-E со спутников NOAA-19 и Aqua, соответственно (рис. 6б). Наибольшие значения  $S$  наблюдаются в зоне вторжения с ветрами 13...15 м/с (рис. 6б) и составляют 200...220 Вт/м<sup>2</sup>. Оценки потоков явного тепла хорошо согласуются с потоками, рассчитанными по данным океанических буев.



Рис. 5. Видимое изображение со спутника Aqua, полученное спектрометрией MODIS в 00:55 Гр. 8 марта 2010 г.

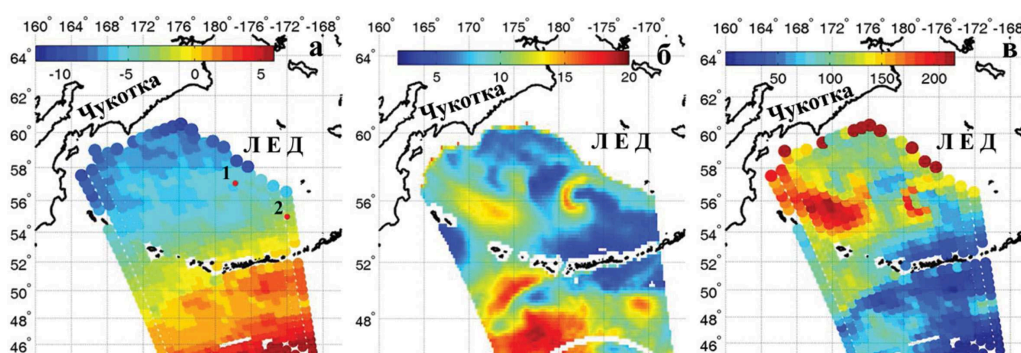


Рис. 6. Поля: а — температуры воздуха у морской поверхности, восстановленной с использованием регионального алгоритма по данным AMSU-A, полученным со спутника NOAA-19 в 01:00 Гр.; б — скорости приводного ветра из измерений AMSR-E (спутник Aqua), выполненных в 00:55 Гр. 8 марта 2010 г.; в — потока явного тепла, рассчитанного по балк-формулам (Fairall et al., 2003). Красными точками отмечено расположение океанических буев, измеривших  $t_a$ : 1 —  $-6,1$ ; 2 —  $-4,0$  °С

## Заключение

В работе разработан новый региональный алгоритм восстановления температуры воздуха у морской поверхности на основе сопряженного массива спутниковых данных и измерений океанических буев, полученного над Беринговым морем при холодных вторжениях – экстремальных погодных условиях, характерных для высоких широт. Моделирование измерений радиометра AMSU-A и оценка чувствительности  $T_y(52,8 \text{ ГГц})$  к вертикальному профилю температуры воздуха в нижней тропосфере (до 2 км), скорости приводного ветра  $W$ , паросодержания атмосферы  $V$  и водозапааса облаков  $Q$  показали, что взаимосвязь средней температуры нижней тропосферы и  $T_y(52,8 \text{ ГГц})$  возрастает при аккуратном учете изменчивости  $T_y$ , обусловленной вариациями параметров  $Q$  и  $W$ . На основе модельных расчетов в алгоритм восстановления  $t_a$  предложено ввести коррекцию  $T_y(52,8 \text{ ГГц})$  на вклад ветра и водозапааса облаков.

Регрессионный алгоритм восстановления температуры воздуха у морской поверхности был использован в комплексном анализе холодного вторжения над Беринговым морем. Полученные оценки температуры воздуха и потока явного тепла, рассчитанного с использованием балк-формул (Fairall et al., 2003), находятся в хорошем соответствии с измерениями океанических буев.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 09-05-13569-офи\_ц), ФЦП «Мировой океан» и проекта № 111 по соглашению между JAXA и ТОИ ДВО РАН.

## Литература

1. Митник Л.М., Митник М.Л. Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 34–44.
2. Пичугин М.К. Восстановление температуры воздуха у морской поверхности при холодных вторжениях: возможности микроволнового радиометра AMSU-A // 9-я Всероссийская открытая ежегодная конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 14–18 ноября 2011: Тез. [Электр. текст]. Режим доступа: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2011.html](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011.html).
3. Пичугин М.К., Митник Л.М. Холодные вторжения над Беринговым морем: спутниковый мульти-сенсорный анализ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 172–179.
4. Bobylev L. P., Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. Atmospheric water vapor and cloud liquid water retrieval over the Arctic Ocean using satellite passive microwave sensing // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 49. N. 1. P. 283–294.
5. Brümmer B., Müller G., Noer G. A Polar Low Pair over the Norwegian Sea // Monthly Weather Rev. 2009. V. 137. N. 8. P. 2559–2575.
6. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B. Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. n. 4. P. 571–591.
7. Goldberg M.D., Crosby D.S., Zhou L. The Limb Adjustment of AMSU-A Observations: Methodology and Validation // J. Appl. Meteor. 2001. V. 40. N. 1. P. 70–83.
8. Jackson D.L., Wick G.A., Bates J.J. Near-surface retrieval of air temperature and specific humidity using multisensor microwave satellite observations // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. D101306. 16 p.
9. Jones C., Peterson P., Gautier C. A new method for deriving ocean surface specific humidity and air temperature: An artificial neural network approach // J. Appl. Meteorol. 1999. V. 38. N. 8. P. 1229–1246.
10. Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K.S., Schlax M.G. Daily High Resolution Blended Analyses for Sea Surface Temperature // J. Climate. 2007. V. 20.
11. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson Ö. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. 2010. V. 327. N. 5970. P. 1246–1250.
12. Singh R., Joshi P.C., Kishtawal C.M. A New Technique for Estimation of Surface Latent Heat Fluxes Using Satellite-Based Observations // Monthly Weather Rev. 2005. V. 133. N. 9. P. 2692–2710.
13. Uttal T., Curry J.A., McPhee M.G., Perovich D.K. et al. Surface Heat Budget of the Arctic Ocean // Bul. American Meteorological Soc. 2002. V. 83. N. 2. P. 255–275.

# Retrieval of surface air temperature during cold air outbreaks on the example of the Bering Sea using AMSU-A measurements

M.K. Pichugin

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far  
Eastern Branch Russian Academy of Sciences  
690041, Vladivostok, Baltiyskaya, 43  
E-mail: pichugin@poi.dvo.ru*

Determination of the turbulent heat fluxes over high latitude regions becomes more actual problem. The calculation of these fluxes requires the use of bulk aerodynamic method requiring estimates of the sea surface temperature ( $T_w$ ), near-surface wind speed ( $W$ ), air temperature ( $t_a$ ), and specific humidity ( $q_a$ ). Errors in algorithms of satellite retrievals of near-surface parameters have been shown to be the main sources of uncertainty in computation of the fluxes. This work describes regression algorithm of the retrieving  $t_a$  over the Bering Sea. The algorithm is based on relationship between  $t_a$  and brightness temperature at a frequency 52.8 GHz ( $Tb_{52.8}$ ) observed from the Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) onboard NOAA satellites. Modeling of the  $Tb_{52.8}$  has shown that relationship becomes closer if the brightness temperature corrected for the influence of cloud liquid water and surface wind speed. The regression coefficients were obtained from a collocated array of satellite data and measurements of ocean buoys in the Bering Sea during cold air outbreaks. RMS error of the air temperature algorithm is 1,71 K for the collocated array. Also, the use of the air temperature algorithm during cold air outbreak over the Bering Sea is shown. Estimates of the turbulent sensible heat fluxes from satellite measurements were obtained.

**Keywords:** air-sea interaction, turbulent fluxes, AMSU-A, brightness temperatures, air temperature, cold air outbreaks, Bering Sea.