**БАРОКЛИННЫЕ И ОРОГРАФИЧЕСКИЕ СТРУИ В
АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НАД ПРОЛИВОМ
ФРАМА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭНЕРГООБМЕН
АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА**

Чечин Д.Г., Люпкес К., Шестакова А.А.

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017, г. Москва,
Пыжевский пер., 3, тел. +7 (495) 951-55-65, +7 (495) 953-16-52,
e-mail: chechin@ifaran.ru*

Low-level jets in the convective atmospheric boundary layer are often formed over the open ocean over the Fram Strait during the off-ice flow, i.e. cold-air outbreaks. By means of idealized numerical and analytical modelling it is shown that baroclinic and orographic jets over the Fram Strait are superimposed upon each other. The effect of the low-level jets on surface fluxes in cold-air outbreaks is quantified.

Холодные вторжения представляют собой натекание холодной арктической воздушной массы на свободную ото льда поверхность океана. При этом разность температур между воздушной массой и поверхностью океана может превышать 30°K. В атмосферном пограничном слое (АПС) над океаном развивается конвекция, которая часто организована в виде облачных гряд и открытых ячеек, а турбулентный поток явного тепла на поверхности океана может превышать 600 Вт·м⁻² вблизи кромки льда [1]. Таким образом, интенсивное взаимодействие атмосферы и океана во время холодных вторжений приводит к выхолаживанию и перемешиванию поверхностных слоев океана. Тем самым, холодные вторжения влияют на модификацию водных масс, региональную циркуляцию в океане и даже на инициализацию глубокой конвекции в Северной Атлантике, которая поддерживает Атлантическую меридиональную циркуляцию [2, 3].

Высокие значения турбулентного потока тепла во время холодных вторжений обусловлены, прежде всего, большой разностью температур между воздухом и поверхностью океана. Однако скорость приводного ветра и ее пространственно-временная изменчивость сильно модулируют величину потоков тепла. Особенно интенсивны во время холодных вторжений мезомасштабные циркуляции, такие как полярные мезоциклоны, низкотропосферные фронты и линии конвергенции.

В фокусе данного исследования струйные течения низкого уровня, которые часто наблюдаются в атмосферном пограничном слое над свободной ото льда поверхностью океана на некотором расстоянии от прикромочной зоны морского льда [4]. В частности, рассматриваются струйные течения над проливом Фрама к северо-западу от Шпицбергена.

Целью работы является оценка чувствительности горизонтального масштаба и амплитуды изменчивости скорости ветра во время холодных вторжений к значениям внешних, крупномасштабных параметров и выявление физических механизмов, приводящих к возникновению (или отсутствию) струйного течения низкого уровня. Задача решается как с помощью аналитического, так и численного негидростатического моделирования [5]. Аналитический подход основан на интегральной модели перемешанного пограничного слоя. Для численных экспериментов использована трехмерная негидростатическая модель NH3D [4, 6]. Также приводится сравнение аналитических решений с данными самолетных наблюдений в Арктике, выполненных сотрудниками Института им. Альфреда Вегенера в ходе нескольких измерительных кампаний.

Представленная в работе аналитическая модель перемешанного АПС, которая описывает прогрев и рост конвективного АПС во время холодных вторжений над океаном в Арктике. Кроме того модель также описывает эволюцию осредненных по высоте пограничного слоя горизонтальных компонент скорости ветра. Особенностью модели является то, что скорость геострофического ветра в АПС представлена как сумма крупномасштабной составляющей и нескольких бароклинных составляющих, связанных с прогревом и ростом АПС. Проведено сравнение аналитических решений с самолетными наблюдениями над проливом Фрама, а также с результатами численной негидростатической модели NH3D. Показано, что аналитическая модель хорошо воспроизводит наблюдающийся рост и прогрев АПС, а также влияние бароклинности на скорость ветра в АПС. В частности, модель воспроизводит усиление ветра в конвективном АПС над океаном, так называемое струйное течение ледового бриза, которое приводит к интенсификации энергообмена между океаном и атмосферой. Аналитические решения также показывают, что в зависимости от ориентации к кромки льда относительно крупномасштабного потока бароклинность может приводить как к усилению приводного ветра, так и к его ослаблению. Бароклинность в АПС наиболее сильна вблизи кромки льда и убывает вниз по потоку с увеличением расстояния от кромки льда (см. также [7]). Получено аналитическое выражение

для характерного горизонтального масштаба, на котором убывает бароклинность в АПС, а также происходит трансформация холодной воздушной массы. Этот масштаб пропорционален разности температур открытой воды и холодной воздушной массы над льдом и составляет 500–1000 км для холодных вторжений в Арктике.

На основе численного моделирования показано, что орография Шпицбергена также существенно влияет на скорость ветра над проливом Фрама во время холодных вторжений. В частности, орографическое струйное течение низкого уровня формируется вблизи северо-западной оконечности Шпицбергена и может усиливать струйное течение ледового бриза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brümmer B. Boundary-layer modification in wintertime cold-air outbreaks from the Arctic sea ice // *Boundary-Layer Meteorology*. 1996. Vol. 80. No. 1. P. 109–125.
2. Mauritzen C. Production of dense overflow waters feeding the North Atlantic across the Greenland-Scotland Ridge. Part 1: Evidence for a revised circulation scheme // *Deep Sea Res.* 1996. Vol. 43. No. 6. P. 769–806.
3. Marshall J., Schott F. Open-ocean convection: Observations, theory, and models // *Rev. Geophys.* 1999. Vol. 37. No. 1. P. 1–64.
4. Chechin D.G., Lüpkes C., Repina I.A., Gryanik V.M. Idealized dry quasi-2D mesoscale simulations of cold-air outbreaks over the marginal sea-ice zone with fine and coarse resolution // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. Vol. 118. P. 8787–8813.
5. Chechin D.G., Lüpkes C. Boundary-layer development and low-level baroclinicity during high-latitude cold-air outbreaks: a simple model // *Boundary-Layer Meteorol.* 2017. Vol. 162. No. 1. P. 91–116.
6. Miranda P.M.A., James I.N. Non-Linear Three-Dimensional Effects On Gravity-Wave Drag: Splitting Flow and Breaking Waves // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1992. Vol. 118. No. 508. P. 1057–1081.
7. Чечин Д.Г., Заболотских Е.В., Репина И.А., Шапрон Б. Влияние бароклинности и экмановского трения на приземную скорость ветра во время холодных вторжений в Арктике // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 2. С. 146–157.