

УДК 551.465.7

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛА ИЗ ОКЕАНА В АТМОСФЕРУ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

© 2016 г. Н. Д. Тилинина, С. К. Гулев, А. В. Гавриков

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: tilinina@sail.msk.ru

Поступила в редакцию 08.06.2015 г.

После доработки 13.08.2015 г.

В работе исследована роль экстремально высоких турбулентных потоков тепла из океана в атмосфере в суммарной океанской теплоотдаче в Северной Атлантике. Проведен анализ атмосферных условий, приводящих к усилению потока тепла из океана в атмосферу в областях, где вклад экстремальных потоков тепла значителен (до 60% всех теплопотерь). Показано, что экстремально высокие потоки тепла из океана в атмосферу в области течения Гольфстрим, морях Лабрадор и Гренландском возникают в зонах с максимальным градиентом атмосферного давления, т.е. в областях взаимодействия атмосферных циклонов и антициклонов.

DOI: 10.7868/S0030157416010214

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентные потоки явного и скрытого тепла из океана в атмосферу в средних и субполярных широтах характеризуются высокой пространственно-временной изменчивостью. На синоптическом масштабе (от нескольких часов до первых суток во времени и от десятков до сотен километров в пространстве) потоки тепла из океана в атмосферу могут варьироваться в пределах сотен и тысяч Вт/м² [10, 13]. Синоптическая изменчивость турбулентных потоков тепла, будучи значительно выше, чем сезонная и межгодовая изменчивость [1, 2, 9, 11], формирует экстремальные турбулентные потоки из океана в атмосферу, которые играют важную роль в формировании океанской конвекции и перемешивания, а также оказывают влияние на нижнюю тропосферу и бароклинность нижних слоев атмосферы [3, 4]. Поэтому достоверное оценивание экстремальных потоков тепла, а также понимание механизмов их возникновения крайне важно. В работе [13] было показано, что экстремально высокие потоки тепла связаны с быстрораспространяющимися над неоднородной океанской поверхностью атмосферными циклонами. Однако авторы [7] показали, что сами по себе атмосферные циклоны не обеспечивают условий для формирования экстремальных потоков тепла из океана в атмосферу и только 43% всех циклонов зимой в Северной Атлантике характеризуются интегральным по площади циклона потоком тепла выше среднего по Северной Атлантике. Это согласуется и с исследованиями [5, 12], которые показали, что в

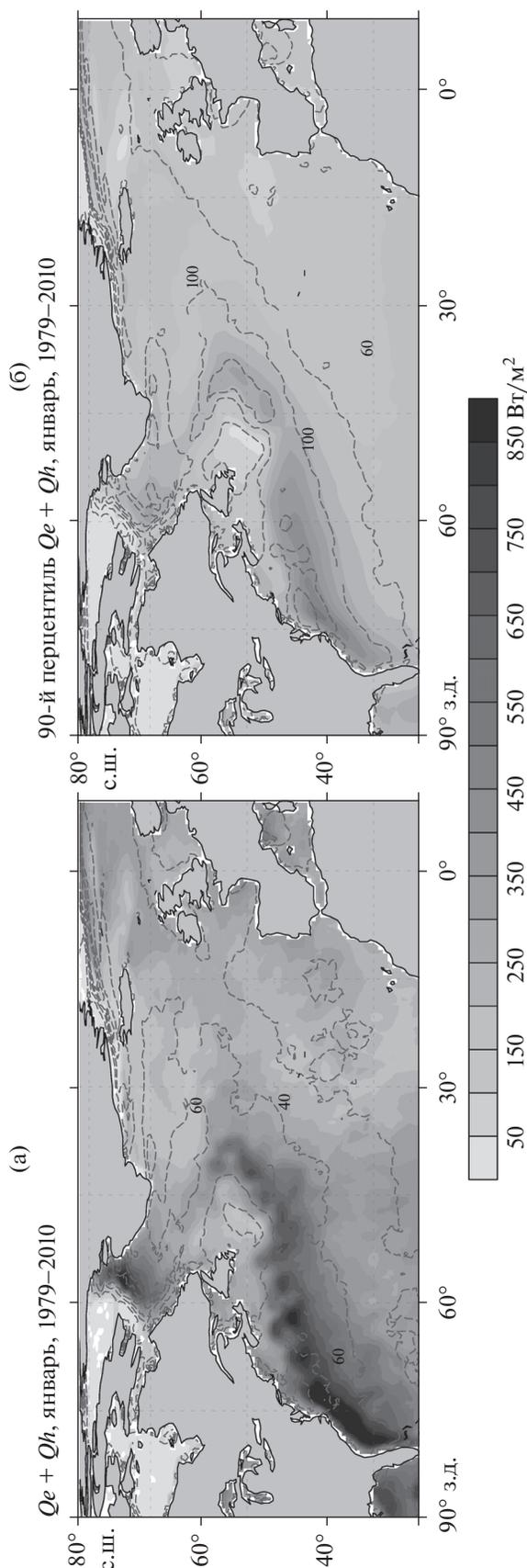
Южном океане большая часть тепла теряется вне циклонов.

В данной работе мы проанализировали механизмы формирования экстремально высоких потоков тепла из океана в атмосферу в средних широтах. Основной целью нашего исследования является описание крупномасштабной атмосферной циркуляции, приводящей к формированию экстремальных потоков тепла из океана в атмосферу за последние несколько десятилетий.

Здесь и далее экстремальными потоками тепла мы называем суммарный турбулентный поток тепла (явное + скрытое тепло), превышающий 90-процентный перцентиль эмпирического распределения для этой точки. В работе рассматриваются только январь с 1979 по 2010 гг., так как именно в январе величины турбулентного теплообмена между океаном и атмосферой максимальны.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались 6-часовые данные о давлении на уровне моря (slp) и о потоках явного (Qh) и скрытого (Qe) тепла из океана в атмосферу из ре-анализа NCEP CFSR [8] за период с 1979 по 2010 гг., с пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, что соответствует ~ 55.5 км на экваторе. Для каждого узла сетки по временным рядам продолжительностью 1 месяц (124 временных шага реанализа) были рассчитаны эмпирические распределения вероятностей суммарного потока тепла ($Qe + Qh$, рис. 1), что позволило оценивать 90-ый перцентиль распределения и анализировать потоки, превышающие его. Таким образом,



мы идентифицировали моменты времени и интенсивности экстремально высоких значений потока тепла в Северной Атлантике по трем регионам: Гольфстрим, Гренландское море и море Лабрадор, характеризующимся высокими значениями потоков и океанологическими процессами, сильно зависящими от взаимодействия океана и атмосферы. На следующем этапе мы анализировали крупномасштабную циркуляцию атмосферы, характерную для моментов времени с экстремально высокими потоками тепла, и строили композиционные картины атмосферного давления, которые позволили описать атмосферные условия, приводящие к формированию экстремально высоких потоков тепла из океана в атмосферу. Чтобы понять роль экстремально высоких потоков тепла в суммарной океанской теплоотдаче, мы оценили вклад тепла, ушедшего за счет потоков, превышающих различные перцентили в суммарную теплоотдачу в каждом узле сетки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 показаны средние январские значения суммарного турбулентного потока тепла ($Q_e + Q_h$) в Северной Атлантике с 1979 по 2010 гг. (рис. 1а) и величины 90-го перцентиля (рис. 1б), полученные на основе эмпирических распределений. Самые высокие значения потока тепла в январе наблюдаются над областью течения Гольфстрим (до 500 Вт/м^2); в море Лабрадор средние значения потока тепла в январе – $250\text{--}300 \text{ Вт/м}^2$, в Гренландском море – $100\text{--}250 \text{ Вт/м}^2$. Пространственное распределение 90-го перцентиля хорошо соотносится со средними, что согласуется с исследованиями [2]. Поток в $700\text{--}1000 \text{ Вт/м}^2$ в области Гольфстрима соответствует 90-ному перцентилю, в то время как в море Лабрадор эта оценка составляет 850 Вт/м^2 , а в Гренландском море – $300\text{--}500 \text{ Вт/м}^2$. Приведенные оценки показывают, что роль экстремально высоких потоков тепла в суммарной океанской теплоотдаче выше в Гольфстриме, море Лабрадор и Гренландском море, так как в единицу времени тепла в этих областях уходит больше, чем в других областях Северной Атлантики. Для оценки этой роли мы приводим рис. 2, на котором изображено распределение потерь тепла в выбранных областях за счет потоков выше различных перцентилей. На экваторе и в тропиках относительная роль экстремально высоких потоков в формировании

← **Рис. 1.** Средний суммарный поток тепла (скрытое + явное) в Северной Атлантике (а), и 90-й перцентиль суммарного потока тепла (б), рассчитанный по эмпирическим распределениям в каждом узле сетки. Пунктиром показано стандартное отклонение. Январь, 1979–2010 гг.

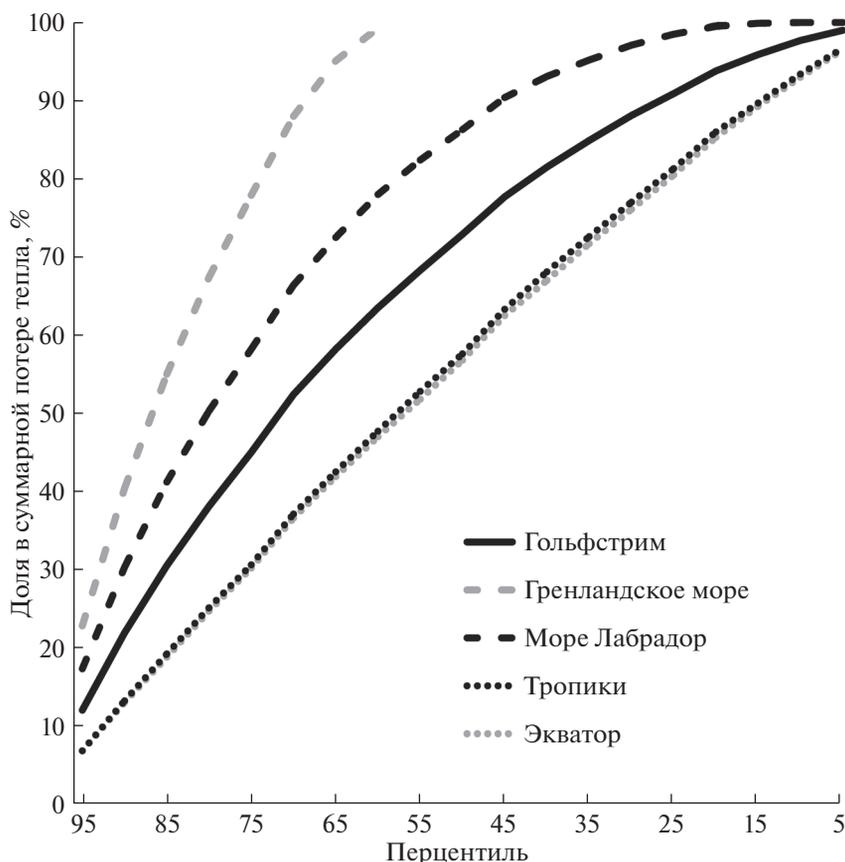


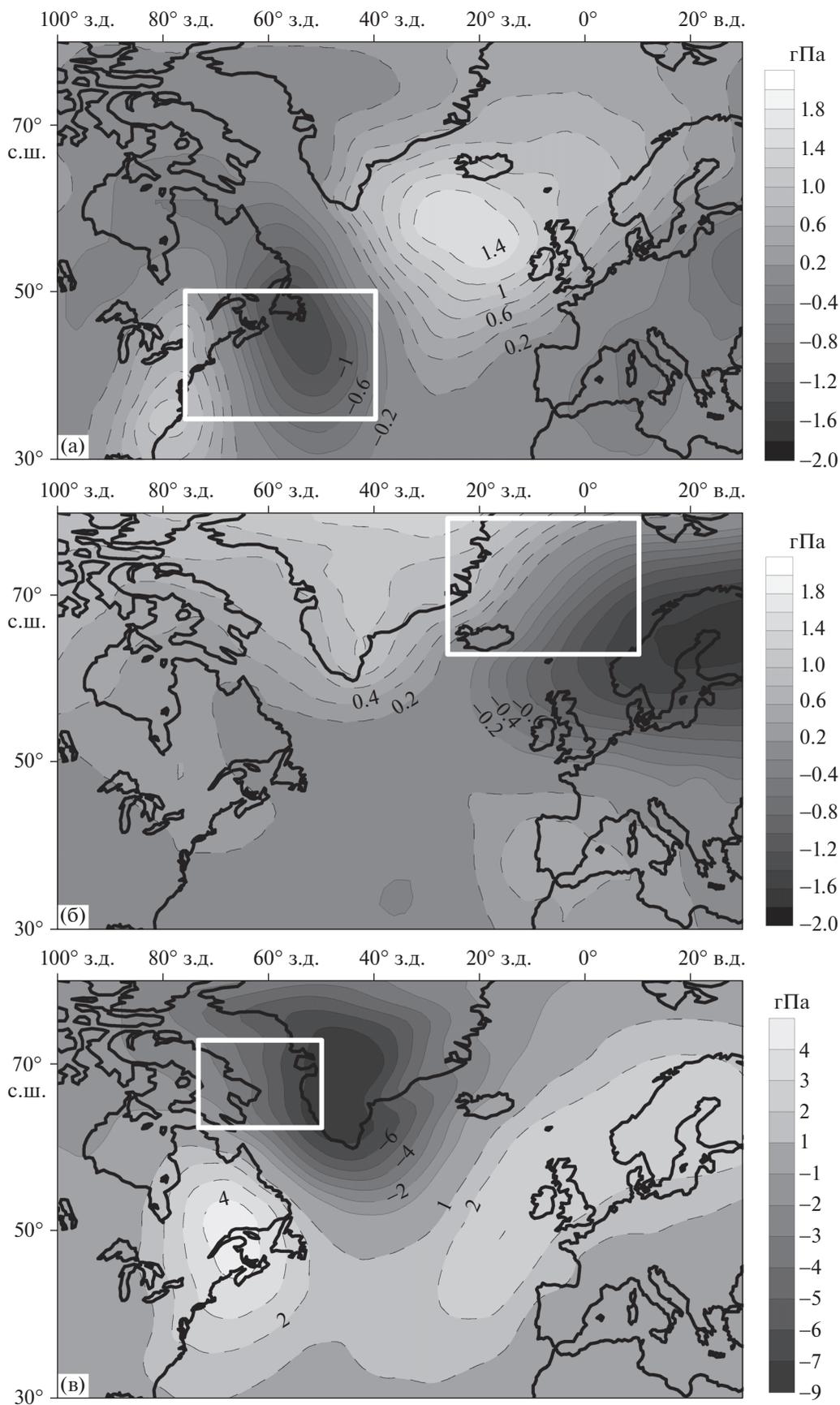
Рис. 2. Распределение доли суммарной теплопотери за счет потоков тепла выше различных перцентилей в точках, характерных для 5 регионов, январь 1979–2010 гг.

суммарного теплообмена значительно меньше, чем в средних и субполярных широтах. Здесь за счет суммарного тепла выше 90-го перцентиля в тропиках океан теряет ~13% тепла. Если же рассмотреть области течения Гольфстрим, моря Лабрадор и моря Ирмингера, то за счет потоков тепла, превышающих 90-й перцентиль, из океана в атмосферу отдается 25, 35 и 55% суммарного тепла соответственно, что свидетельствует о том, что роль экстремально высоких потоков тепла в формировании режима океанской теплопотери в этих регионах выше, чем в среднем по Северной Атлантике. Другими словами, в этих районах потоки тепла редкой повторяемости в значительной степени формируют режим теплоотдачи, тогда как в областях, где относительная роль экстремальных потоков ниже, теплопотери происходят более равномерно во времени.

В силу высокой синоптической изменчивости приводного слоя в области Гольфстрима, Гренландского моря и моря Лабрадор периоды экстремально высоких теплопотерь чередуются с периодами, когда поток ниже среднего или даже отрицательный. Такая перемежаемость периодов сильных теплопотерь с периодами относительно

слабых или даже отрицательных (направленных в океан) потоков связана с синоптической динамикой атмосферы, что согласуется с исследованиями [13], где было показано, что аномалии потока тепла из океана в атмосферу распространяются вместе с аномалиями атмосферного давления, т.е. циклонами и антициклонами.

На рис. 3 мы приводим композиционные картины аномалий атмосферного давления, построенные для моментов возникновения экстремально высоких потоков тепла ($Q_e + Q_h$) из океана в атмосферу. Построение композитов давления включало для каждого района отбор случаев, когда суммарный поток тепла превышал 90-й перцентиль эмпирического распределения и расчет для этого момента времени средней аномалии давления на уровне моря по отношению к среднеянварскому давлению с 1979 по 2010 гг. Для всех приведенных композиционных картин во всех трех исследованных регионах характерно наличие в приводном слое атмосферы синоптической ситуации, характеризующейся зоной взаимодействия циклон – антициклон (то есть взаимосвязанных положительной и отрицательной аномалий давления). Это приводит к возникновению



← **Рис. 3.** Средние аномалии давления на уровне моря (гПа) в моменты, когда суммарный поток тепла над областью течения Гольфстрим (а), морем Лабрадор (б), Гренландским морем (в), превышал 90-й перцентиль эмпирического распределения для соответствующих регионов. Аномалии рассчитаны по отношению к среднему климатологическому давлению в январе (с 1979 по 2010 гг.). Положительные аномалии обведены штриховкой. Белыми квадратами отмечены области, в которых искались превышения потока тепла над 90-м перцентилем.

выноса холодной и относительно сухой воздушной массы из северных областей на относительно теплую подстилающую поверхность океана при умеренных и сильных ветрах. Эти условия, называемые *cold-air outbreak* [6], приводят к резким понижениям температуры воздуха, увеличению скорости ветра и росту температурного и влажностного градиентов между поверхностью океана и воздухом, что, в свою очередь, приводит к усилению потока тепла из океана в атмосферу.

Таким образом, возникновение экстремальных турбулентных потоков тепла из океана в атмосферу связано не с циклонической активностью самой по себе, а с формированием атмосферного диполя, состоящего из положительной и отрицательной аномалий давления и образующего зону взаимодействия циклона и антициклона, когда вынос холодного воздуха из северных областей на океанскую поверхность определяет резкое увеличение температурных и влажностных контрастов в приводном слое и, как следствие, возникновение экстремальных потоков тепла. Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление типа циклонов, которые связаны с антициклонами в тыловой части, описание параметров их жизненного цикла и исследование крупномасштабных атмосферных циркуляционных условий, ответственных за увеличение или уменьшение повторяемости таких ситуаций.

Все расчеты и исследования выполнены за счет гранта РНФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cayan D.R.* Latent and sensible heat flux anomalies over the north oceans: the connection to monthly atmospheric circulation // *J. Climate*. 1992. V. 5. P. 354–369.
2. *Gulev S.K., Belyaev K.* Probability Distribution Characteristics for Surface Air–Sea Turbulent Heat Fluxes

- over the Global Ocean // *J. Climate*. 2012. V. 25. P. 184–206.
3. *Minobe S., Kuwano-Yoshida A., Komor N. et al.* Influence of the Gulf Stream on the troposphere // *Nature*. 2008. V. 452. P. 206–209.
4. *Moore G.W.K., Renfrew I.A.* An assessment of the surface turbulent heat fluxes from the NCEP–NCAR reanalysis over the western boundary currents // *J. Climate*. 2002 V. 15. P. 2020–2037.
5. *Patoux J., Yuan X., Cuihua Li.* Satellite-based midlatitude cyclone statistics over the Southern Ocean: 1. Scatterometer-derived pressure fields and storm tracking // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2009. V. 114, no. D04105.
6. *Renfrew Ian A., Moore G.W.K.* An extreme cold-air outbreak over the Labrador Sea: Roll vortices and air–sea interaction // *Mon. Wea. Rev.* 1999. V. 127. № 10. P. 2379–2394.
7. *Rudeva I.A., Gulev S.K.* Composite analysis of North Atlantic extratropical cyclones in NCEP–NCAR reanalysis data // *Mon. Wea. Rev.* 2011 V. 139. № 5. P. 1419–1446.
8. *Saha S., Moorthi S., Pan H.L. et al.* The NCEP climate forecast system reanalysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91. № 8. P. 1015–1057.
9. *Shaman J., Samelson R.M., Skillingstad E.* Air–sea fluxes over the Gulf Stream region: Atmospheric controls and trends // *J. Climate*. 2010. V. 23. P. 2651–2670.
10. *Yau M.K., Jean M.* Synoptic aspects and physical processes in the rapidly intensifying cyclone of 6–8 March 1986 // *Atmos.–Ocean*. 1989. V. 27. P. 59–86.
11. *Yu L., Weller R.A.* Objectively analyzed air–sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981–2005) // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2007. V. 88. P. 527–539.
12. *Yuan X., Patoux J., Cuihua Li.* Satellite-based midlatitude cyclone statistics over the Southern Ocean: 2. Tracks and surface fluxes // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2009. V. 114. no. D04106.
13. *Zolina O., Gulev S.K.* Synoptic variability of ocean–atmosphere turbulent fluxes associated with atmospheric cyclones // *J. Climate*. 2003. V. 16. P. 2717–2734.

Formation of the Extreme Surface Turbulent Heat Fluxes in North Atlantic

N. D. Tilinina, S. K. Gulev, A. V. Gavrikov

We analyzed the role of extreme surface turbulent fluxes in the net oceanic heat loss in the North Atlantic. Over the Gulfstream ocean losses more than 25% of the heat by extremes, over Greenland and Labrador Sea up to 60%. We also described atmospheric circulation patterns that lead to the enhancement of heat flux from the ocean to atmosphere in the areas where extremes are important. It has been shown that extreme fluxes occur in the interaction zones between cyclones and high pressure systems, where the cold air outbreak results in strong surface gradients.