

## Накопление пара в атмосфере в период угрозы зарождения или прохождения штормов

С.В. Маречек, Д.М. Ермаков, М.Т. Смирнов

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязинский филиал, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1,  
e-mail: marechek@ire.rssi.ru*

В работе рассматривается динамика накопления пара в атмосфере, которая является основой энергетической концепции механизма развития и функционирования тропических циклонов и штормов. Основным источником энергии возмущений является теплота конденсации водяного пара в мощных конвективных облаках в атмосферном пограничном слое. Приведены данные многосуточных измерений радиояркостной температуры на длине волны 1,35 см как при безоблачном состоянии атмосферы и штиле на море, так и в условиях предшествующих шторму. Были получены данные оптической толщины водяного пара при различных погодных условиях в прибрежной зоне Черного моря.

**Ключевые слова:** механизм зарождения тропических циклонов, накопление пара в атмосфере, шторм, радиометрия атмосферы.

### Введение

Широко известна энергетическая концепция механизма развития тропических циклонов (ТЦ). В соответствии с этой концепцией, основным источником энергии возмущений является теплота конденсации водяного пара в мощных конвективных облаках («горячих башнях») в атмосферном пограничном слое. Эта концепция послужила основой многих теоретических работ по анализу условий развития тропических возмущений различных пространственных и временных масштабов (Bister, Emanuel, 1998; Charney, Eliassen, 1964; McBride, Fraedrich, 1995; Wang et al., 2010). Для реализации явления ТЦ необходим запас потенциальной энергии, которая относительно быстро может перейти в кинетическую энергию экстремальных скоростей ветра. Эта потенциальная энергия накапливается в атмосфере над океаном постепенно, до начала формирования циклона. Ее источником в наиболее общем смысле является солнечная энергия. Поток солнечной энергии нагревает верхний слой океанской воды. От водной поверхности нагревается воздух. Происходит интенсивное испарение (так называемый «поток скрытого тепла»). В результате пограничный слой толщиной 1...2 км заполняется теплым и влажным воздухом. Проведенные измерения показывают, что относительная влажность на высоте 10 м над поверхностью достигает 85...100 %. Если такой приповерхностный слой воздуха начнет подниматься в более высокие слои атмосферы, то при определенных условиях влага сыграет роль «топлива», поскольку значительное тепло выделяется во время ее конденсации при подъеме. Таким образом, необходимым условием возникновения ТЦ является наличие приповерхностного слоя влажного и теплого воздуха толщиной 1...2 км, распространенного на обширной территории. Мощность зарождающегося из депрессии ТЦ зависит от потенциальной энергии, накопленной в приповерхностном слое. Количество накопленной потенциальной энергии определяется толщиной слоя, количеством паров воды в воздухе, его температурой и площадью такой территории, а также возможными процессами ее диссипации.

### Методика оценки накопленной потенциальной энергии в атмосфере

Плотность на единицу площади накопленной потенциальной энергии атмосферы в районе возможного зарождения ТЦ может быть оценена, если будут известны распределение в атмосфере по высоте пара и температуры.

Эти параметры атмосферы могут быть измерены радиометрами. Интенсивность собственного теплового излучения атмосферы зависит от спектра поглощения радиоволн атмосферой. Спектр поглощения радиоволн водяным паром и кислородом безоблачной атмосферы приведен на рис. 1.

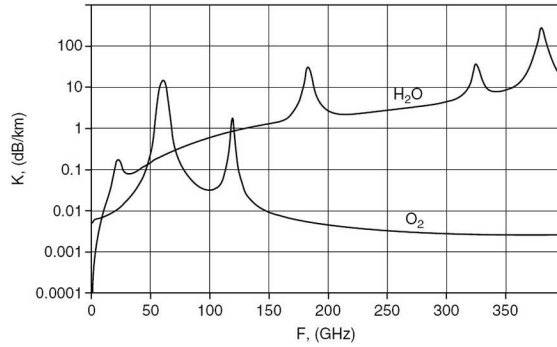


Рис. 1. Спектр коэффициента поглощения радиоволн водяным паром и кислородом безоблачной атмосферы на уровне моря для стандартного значения плотности пара  $7,72 \text{ г/м}^3$

Водяной пар имеет линии поглощения на длинах волн  $1,35 \text{ см}$  ( $f = 22,23515 \text{ ГГц}$ ),  $0,16 \text{ см}$  ( $f = 183,31012 \text{ ГГц}$ ),  $0,092 \text{ см}$  ( $f = 325,1538 \text{ ГГц}$ ) и  $0,079 \text{ см}$  ( $f = 380,1968 \text{ ГГц}$ ), а так же много линий в субмиллиметровом диапазоне волн. Максимум поглощения в длинноволновой части спектра наблюдается на резонансной длине волны  $\lambda = 1,35 \text{ см}$

$$\frac{\gamma_w}{\rho_w} \cong 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ дБ/км/г/м}^3, \quad (1)$$

где  $\gamma_w$  (дБ/км) — коэффициент поглощения радиоволн;  $\rho_w$  ( $\text{г/м}^3$ ) — плотность водяного пара. Зависимость от высоты  $h$  для стандартной модели атмосферы может быть представлена в первом приближении в виде экспоненциальной модели [Armand, Polyakov, 2005]:

$$\gamma_w(h) = \gamma_{w0} \exp\left(-\frac{h}{H_{\gamma_w}}\right), \quad (2)$$

где  $\gamma_{w0}$  — коэффициент поглощения на уровне моря;  $H_{\gamma_w}$  — в зависимости от времени года может принимать значение в диапазоне  $2 \dots 5 \text{ км}$ . В первом приближении для описания высотного распределения плотности водяного пара может быть использована экспоненциальная модель

$$\rho_w(h) = \rho_0 \exp\left(-\frac{h}{H_w}\right), \quad (3)$$

где  $\rho_0$  — плотность водяного пара на уровне моря;  $H_w \cong H_{\gamma_w}$  для длин волн резонансного поглощения. Для приближенных вычислений можно использовать экспоненциальную модель распределения термодинамической температуры по высоте

$$t(h) = t_0 \exp\left(-\frac{h}{H_t}\right), \quad H_t = 44,3 \text{ км}. \quad (4)$$

Зависимость коэффициента поглощения молекулами кислорода от высоты может быть описана экспоненциальной моделью

$$\gamma_{ox}(h) = \gamma_{ox0} \exp\left(-\frac{h}{H_{ox}}\right), \quad (5)$$

где  $H_{ox} = 5,3 + 0,022(t_0 - 273) \text{ км}$ . Общее поглощение в атмосфере описывается суммой

$$\gamma_{at} = \gamma_w + \gamma_{ox}. \quad (6)$$

В действительности реальные значения распределений температуры и плотности пара по высоте могут отличаться от стандартной экспоненциальной модели.

Для оценки запасенной энергии в толще атмосферы удобно использовать радиометры, работающие вблизи резонансных линий поглощения пара и кислорода. Например, радиометр, работающий на длине волны 5 мм (линия поглощения кислорода), позволяет получить данные о распределении температуры воздуха по высоте в нижнем слое атмосферы. Значения радиояркостной температуры, полученные радиометром, работающим на длине волны 1,35 см (линия поглощения пара), дают представление об интегральном содержании пара и его температуре в атмосфере. Таким образом, данные радиометров могут быть использованы для мониторинга энергетических процессов в атмосфере на обширной территории возможного зарождения ТЦ. Значения радиояркостной температуры радиометра, работающего на длине волны 1,35 см, представляют собой энергетический показатель состояния атмосферы. Поскольку значения радиояркостной температуры включают в себя в виде произведения температуру и количество пара в атмосфере по направлению зондирования. Радиояркостная температура может быть выражена через коэффициенты поглощения и термодинамическую температуру

$$T_b(\mu) = \frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} \gamma(h) t(h) \exp\left(-\frac{\tau(0, h)}{\mu}\right) dh, \quad \tau(0, h) = \int_0^h \gamma(h') dh', \quad (7)$$

где  $\tau(0, h)$  — оптическая толщина влажного слоя атмосферы;  $\mu = \cos\theta$ ;  $\theta$  — угол отклонения от зенита. Если осуществлять последовательно зондирование атмосферы с поверхности Земли под разными углами отклонения от зенита, то можно получить характеристики (представления) о распределении запаса энергии по высоте в нижнем слое атмосферы.

### Натурный эксперимент в прибрежной зоне Черного моря

В прибрежной зоне на берегу Черного моря были проведены комплексные исследования параметров атмосферы и водной поверхности. Главной целью выполненных измерений было экспериментальное исследование изменчивости параметров атмосферы и водной поверхности в различных погодных условиях. Для этого были проведены многосуточные измерения параметров атмосферы и водной поверхности. Измерения проводились в период с 12 сентября по 10 октября 2010 г. Были получены данные как при безоблачном состоянии атмосферы и штиле на море, так и в условиях предшествующих шторму и развития шторма. Приборы измерительного комплекса располагались на конце пирса. Пирс имеет длину около 200 м. Глубина моря в месте расположения измерительного комплекса равна 7 м.

Часть приборов радиометрического комплекса, работающие на длинах волн 3; 8; 1,35 см и одна из видео камер, были установлены на сканирующую платформу. Сканирующая платформа была вынесена над поверхностью воды на высоте 5 м с помощью металлической фермы длиной 5 м, что позволило, при сканировании по углу места на 180 градусов, визировать приемные антенны радиометрического комплекса на водную поверхность, атмосферу и калибровочные эталонные излучатели.

Антенны всех радиометров юстированы и направлены в одну область пространства. Сканирование антеннами исследуемого пространства осуществлялось путем подачи команд двигателям поворотного устройства по программе с компьютера управления. Азимутальный двигатель устанавливал платформу на заданный угол по азимуту и удерживал ее в этом положении. Двигатель поворота по углу места медленно осуществлял сканирование, проходя значения углов места от надира до зенита и обратно. Далее быстрый разворот на следующий заданный угол азимута и медленное сканирование по углу места. Сканирование полупространства осуществлялось с охватом по азимуту в пяти фиксированных на-

правлениях через 30 градусов. В начале и в конце азимутального цикла антенная система при визировании в надир принимала излучение абсолютно черного тела. Это позволило иметь эталонные значения сигналов на выходе радиометров для калибровки. Синхронно с записью выходных сигналов радиометров, велась запись значений текущих углов места, азимута и крена для угла визирования антенн. Установленная на поворотной платформе видео камера, позволила выбрать те сканы полупространства, которые относятся к безоблачной атмосфере. Типичная форма выходного сигнала радиометра, работающего на длине волны 1,35 см, для одного скана, который был сделан по углу места от зенита до надира, изображен на рис. 2.

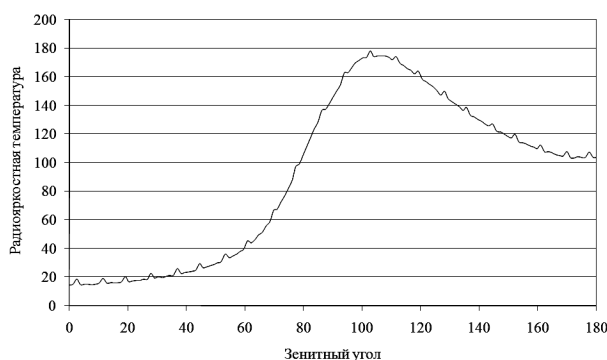


Рис. 2. Радиояростные температуры, измеренные радиометром на длине волны 1,35 см, для скана по углу места от зенита до надира

На рис. 3 представлены значения радиояростной температуры, измеренные на длине волны 1,35 см, полного сканирования полупространства в пяти фиксированных значениях азимута и непрерывным сканированием по углу места от зенита до надира. На рисунке радиояростная температура сканов полупространства размещены «блоками» по календарным датам, предшествующим прохождению циклона с 23 по 30 сентября. Эпицентр циклона прошел над измерительным комплексом 1 октября 2010 г. Значения радиояростной температуры для каждого из дней, предшествующих прохождению циклона, приведены для времени суток (10 часов), когда наблюдался минимум суточной облачности атмосферы. На рис. 3 видно увеличение радиояростной температуры, связанных с накоплением пара в атмосфере по мере приближения даты прохождения циклона. На рис. 4 приведены значения температуры (кривая 1, °C) и плотности пара (кривая 2, г/м<sup>3</sup>) в дни предшествующие циклону. Из которого видно, что за четверо суток до прохождения циклона, наблюдалось повышение температуры и влажности приповерхностного воздуха. На рис. 5 приведены данные сканов по углу отклонения от зенита для одного направления по азимуту и времени суток (10 ч). На этом рисунке семейство кривых образовано измеренными данными в разные сутки, предшествующие прохождению циклона и данные модельных расчетов. В модельных расчетах радиояростной температуры использовались измеренные данные температуры и влажности воздуха на высоте 6 м над уровнем воды. Расчеты выполнены с использованием выражений (7) для 23 и 30 сентября (кривые 2 и 4). Измеренные значения радиояростной температуры для данных от 23 сентября (кривая 1) несколько меньше чем в модельных представлениях стандартной атмосферы. В целях лучшего совпадения измеренных значений радиояростной температуры со значениями, полученными с использованием модели, была уменьшена в экспоненциальной модели характеристическая высота  $H_w$  с 5 до 3 км (кривая 2). Измеренные значения радиояростной температуры для данных от 30 сентября (кривая 3) несколько больше чем в модельных представлениях стандартной атмосферы. В целях лучшего совпадения измеренных значений радиояростной температуры со значениями, полученными с использованием модели, была увеличена в экспоненциальной модели характеристическая высота  $H_w$  с 5 до

10 км (кривая 4). Были проделаны аналогичные коррекции характеристической высоты в модели стандартной атмосферы, по критерию наилучшего совпадения с измеренными значениями яркостных температур, для сканов по всем датам. Полученные таким образом значения характеристической высоты для дней предшествующих прохождению циклона приведены на рис. 6. По мере приближения к дате прохождения циклона, увеличивается характеристическая высота  $H_w$ . Это свидетельствует о накоплении в атмосфере потенциальной энергии в виде запаса водяного пара в большем количестве, чем это имеет место в стандартной атмосфере. Однако 25 сентября наблюдается большой всплеск значения характеристической высоты, который физически не может быть обоснован. Это свидетельствует о существенных различиях модельных представлений и действительного закона распределения плотности пара по высоте.

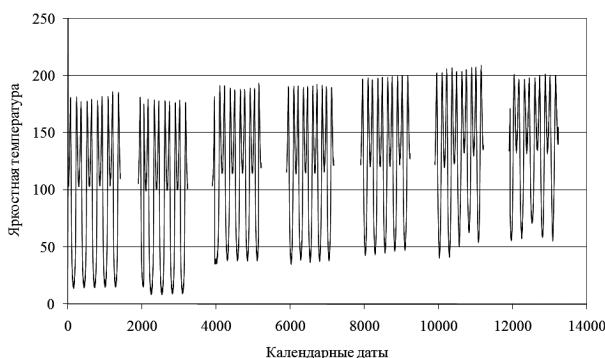


Рис. 3. Радиояркостные температуры сканов полупространства, измеренные радиометром на длине волны 1,35 см, и размещенные «блоками» по календарным датам, предшествующим прохождению циклона с 23 по 30 сентября

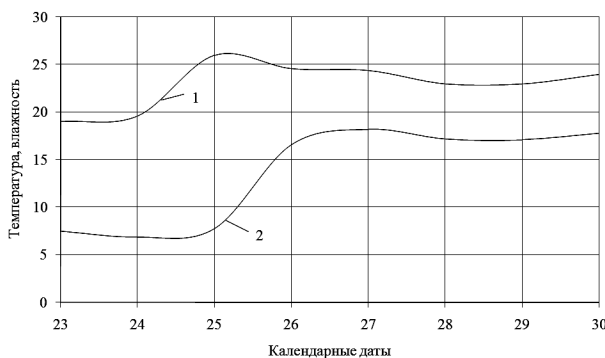


Рис. 4. Температура воздуха (кривая 1, °C) и плотность пара (кривая 2, г/м<sup>3</sup>), измеренные на уровне 8 м от поверхности воды в дни предшествующие прохождению циклона

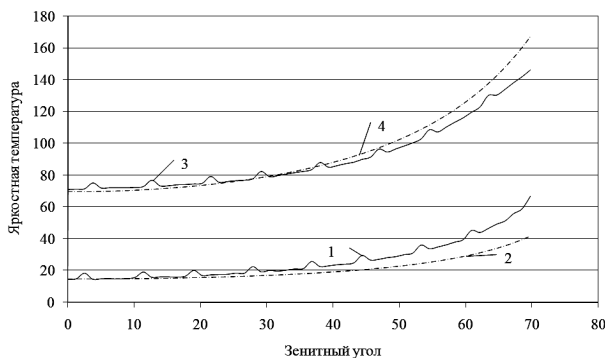


Рис. 5. Измеренные значения радиояркостных температур сканов по углу отклонения от зенита (кривая 1 соответствует 23 сентября, а кривая 3 — 30 сентября) и расчетные значения радиояркостных температур по модели с коррекцией характеристической высоты (кривая 2 для 23 сентября, а кривая 4 для 30 сентября)

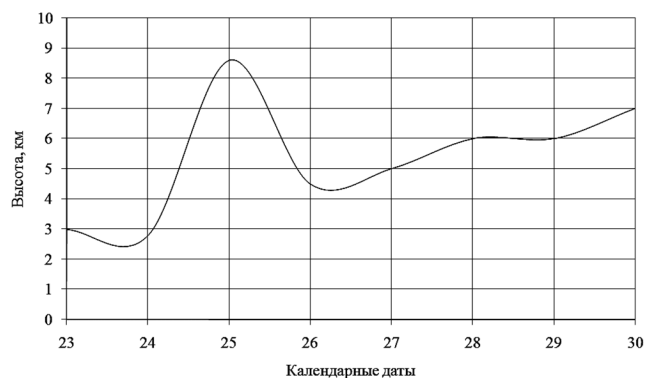


Рис. 6. Значения характеристической высоты для календарных дат, предшествующих прохождению циклона

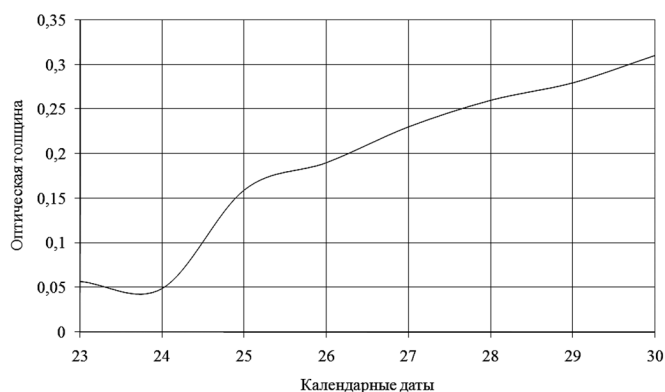


Рис. 7. Значения оптической толщины для календарных дат, предшествующих прохождению циклона

Для оценки динамики накопления пара в атмосфере лучшие результаты могут быть получены при использовании, вместо значения характеристической высоты, такого параметра как оптическая толщина. Значения оптической толщины при зондировании в зенит для дней предшествующих прохождению циклона были вычислены по формуле (7) и приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что значения оптической толщины слабо зависят от возможных неточностей модельных представлений и в тоже время сильно изменяются в зависимости от содержания пара в «столбе» по направлению зондирования.

### Заключение

1. Значения радиояркостной температуры, измеренные на длине волны 1,35 см в условиях безоблачной атмосферы могут быть использованы для оценки энергетического состояния атмосферы в преддверии зарождения или прохождения циклона.
2. Значение характеристической высоты в уточненной экспоненциальной модели атмосферы может быть использовано для оценки толщины влажного слоя атмосферы.
3. Значения оптической толщины, обладая слабой зависимостью от возможных неточностей модельных представлений, позволяют контролировать изменчивость содержания пара в столбе по направлению зондирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 08-05-00890-а, 09-02-00780-а, 10-02-10019-к, 10-05-10054-к) и Международного научно-технического центра (МНТЦ) гранта № 3827.

## Литература

1. *Bister M., Emanuel K.A.* Dissipative heating and hurricane intensity // *Meteorology and Atmospheric Physics*. 1998. V. 50. P. 233–240.
2. *Charney J.G., Eliassen A.* On the growth of the hurricane depression // *J. Atmospheric Sciences*. 1964. V. 21. P. 68–75.
3. *McBride J.L., Fraedrich K.* CISK: A theory for the response of tropical convective complexes to variations in sea surface temperature // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 1995. V. 121. P. 783–796.
4. *Wang G., Dolman A.J., Blender R., Fraedrich K.* Fluctuation regimes of soil moisture in ERA-40 re-analysis data // *Theoretical and Applied Climatology*. 2010. V. 99. P. 1–8. doi: 10.1007/s00704-009-0111-3.
5. *Armand N.A., Polyakov V.M.* Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment. CRC Press. 2005. 440 p.

### Steam accumulation in atmosphere in threat of origin or passing of storm

S.V. Marechek, D.M. Ermakov, M.T. Smirnov

*Fryazino branch of the Institution of Russian academy of sciences Kotel'nikov Institute of Radio  
Engineering and Electronics of RAS,  
Vvedensky sq., 1, Fryazino, Moscow region, Russia, 141190,  
e-mail: marechek@ire.rssi.ru*

In this work is considered dynamics of accumulation of a steam in atmosphere which is a basis of the power concept of the gear of development and functioning of tropical cyclones and storm. The basic power source of indignations is warmth of condensation of water vapors in high-power convection clouds in an atmospheric boundary layer. In this work are cited data of multidiurnal measurements of radio bright temperature on a wave-length 1.35 cm as at cloudless condition of atmosphere and a calm sea on sea, and in the conditions of previous a storm. There have been obtained data of an optical thickness of a water vapor under various weather conditions in a near-shore area of Black sea.

**Keywords:** gear of origin of tropical cyclones, steam accumulation in atmosphere, storm, atmosphere radiometry.