

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОТРАЖЕНИЙ ОТ АТМОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ТРОПОСФЕРЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ТЕРМИКАМИ

*В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, Д.Б. ЕВСЕЕВ, С.В. ЮДИН, Д.А. ГАРЯЧИЙ, А.И. ЛИТВИН-ПОПОВИЧ*

В работе рассматриваются результаты радиолокационных наблюдений конвективных термиков в нижней тропосфере. Проведен анализ суточного и годового хода численности термиков. Исследованы зависимость появления термиков от метеопараметров. Показано, что численность термиком имеет выраженную зависимость от температуры приземного воздуха и изменения температуры приземного воздуха во времени. Получены статистические характеристики радиолокационных отражений от термиком.

*Ключевые слова:* радиолокационные исследования, РЛС вертикального зондирования, диэлектрическая проницаемость, термический конвективный процесс, механизм образования, амплитудно-временная характеристика, зависимость, относительная численность.

### ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные отражения от «ясного неба» регистрировались радиолокационными станциями фактически с начала развития этого направления радиотехники. В связи с неясной природой появления этих отражений, и отсутствием визуальных целей, от которых происходило отражение, эти явления получили название «ангел-эхо». Основной интерес к «ангелам» был вызван, прежде всего, проблемой обнаружения ложных целей радаром противовоздушной обороны [1, 2]. Такие отражения присутствуют при проведении зондирования атмосферы как электромагнитными, так и акустическими колебаниями.

В результате экспериментальных исследований Дэвид Атлас (David Atlas) [3] подробно исследовал различные виды отражений от метеобразований, выделяя: отражения от восходящих потоков под кучевыми облаками; отражения в форме мантии, связанные с границами кучевых облаков; слоистые отражения, связанные с резким вертикальным градиентом или минимумом в вертикальном распределении влажности; аномальные слабые отражения, возникающие, вероятно, на границе областей с различной влажностью при контакте теплых влажных и холодных влажных воздушных масс. При этом он полагал, что полученные результаты дают однозначное эмпирическое подтверждение связи появления ангел-эхо с градиентом коэффициента преломления, вызванным метеорологическими причинами.

Значительный вклад в исследование отражений от атмосферных неоднородностей внёс А.А. Черников [4]. Им исследованы возможные источники отражений от ясного неба, характеристики отражающих объектов в атмосфере, предложено применение поляризационных измерений для идентификации источников рассеяния.

Источниками рассеяния зондирующего сигнала могут быть аэрозоли, насекомые, птицы, флуктуации коэффициента преломления атмосферы, вызванные флуктуациями её плотности,

температуры, влажности [1]. Возникновение градиентов диэлектрической проницаемости в нижней атмосфере может происходить в результате протекания термических конвективных процессов. В соответствии с современными представлениями конвективные движения в атмосфере являются результатом нагрева земной поверхности Солнцем. Они описываются различными проявлениями, одним из которых является возникновение нагретого объёма воздуха у поверхности Земли, который под действием сил плавучести увлекается вверх, приводя к образованию восходящих потоков воздуха в атмосфере Земли. В процессе подъёма сферический объём нагретого газа сворачивается в вихревое кольцо. Таким образом, термик это термическая турбулентность, возникающая вследствие атмосферной конвекции, т.е. вертикального перемещения объёмов воздуха, плотность которых отличается от плотности окружающего воздуха [5].

Конвективные термики являются базовыми элементами тонкой структуры пограничного слоя атмосферы и представляют существенный интерес для метеорологии. В естественных условиях развитие конвективных термиком во влажной атмосфере сопровождается процессом облакообразования, а также управляет процессом переноса природного аэрозоля. Под воздействием динамических процессов термики могут переносить вовлеченные загрязняющие вещества на значительные расстояния, что оказывает негативное влияние на экологическую обстановку окружающей среды.

Исследование характеристик радиолокационных отражений от атмосферных неоднородностей, обусловленных термиками, необходимо для решения фундаментальных и прикладных задач распространения радиоволн в атмосфере, физики атмосферных процессов, обеспечения экологического мониторинга, для создания надежных систем подавления мешающих радиолокационных отражений, обеспечения безопасности взлета и посадки летательных аппаратов.

## 1. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕРМИКОВ

Механизм образования конвективных термик в настоящее время хорошо изучен [6]. Структура термик аналогична структуре осесимметричного турбулентного вихревого кольца (ТВК), поэтому для математического описания их движения используют соотношения, описывающие движение вихревого кольца в несжимаемой атмосфере. ТВК может переносить свою энергию без значительной диссипации на большие расстояния. ТВК представляет собой тороидальный объем завихренного газа, который движется в атмосфере перпендикулярно плоскости вихревого кольца. Вместе с тороидальным ТВК движется некоторый объем газа – атмосфера вихря, которая интенсивно обменивается массой с окружающей средой. В верхней части термика, вблизи его передней границы, течение весьма нестабильно, что приводит к образованию турбулентной зоны, которая имеет вид оболочки полусферического сегмента. Аномально высокие уровни эхо-сигналов при зондировании атмосферы объясняются отражением электромагнитных колебаний от резкой сферической или тороидальной границы термика [6]. В конвективных неоднородностях градиенты показателя преломления достигают 5-7 N-единиц/м [4].

На процесс подъема термика воздействуют динамические и орографические явления. Вертикальная скорость подъема термика зависит от альbedo земной поверхности, над которой появляются термики; чем больше альbedo, тем меньше прогревается земная поверхность и понижается вероятность образования термика с большой вертикальной скоростью. Вертикальная скорость движения термика зависит от разницы температур между восходящим и окружающим воздухом. Скорость подъема изолированного объема нагретого воздуха определяется как

$$\omega = \sqrt{\frac{4Rg(T - T')}{9T}},$$

где  $R$  – радиус кривизны переднего фронта объема нагретого воздуха ( $R=2r$ ;  $r$  – радиус термика);  $T$  – средняя температура окружающего воздуха;  $T'$  – температура поднимающегося воздуха.

Температура воздуха в слое активной конвекции термика может превышать температуру окружающего воздуха на величину до 1,5 °C. Горизонтальные градиенты температуры достигают 0,05 °C/м [7]. По мере «всплывания» температура термика падает. По мере приближения к верхней границе распространения термик становится холоднее окружающего воздуха. На место поднимающегося термика поступает окружающий воздух, образуя нисходящий поток.

Результаты измерений, выполненные с помощью летательных аппаратов, показывают [7], что поперечные размеры конвективных термик увеличиваются с высотой и лежат в пределах от

десятков метров до сотен метров в диаметре, в зависимости от различных факторов: рельефа, скорости приземного ветра, освещенности, давления. Важной характеристикой движения ТВК является коэффициент роста его радиуса  $R$  с расстоянием  $L$

$$\alpha = dR/dL.$$

Обычно диапазон изменения  $\alpha$  лежит в пределах  $10^{-3}$ – $10^{-1}$  [6].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для радиолокационных исследований термических конвективных процессов использовалась РЛС вертикального зондирования (РЛС ВЗ) S диапазона. Выбранный частотный диапазон РЛС позволяет регистрировать отражения, как от атмосферных неоднородностей диэлектрической проницаемости, так и от гидрометеоров.

Антенная система РЛС ВЗ представляет собой две прямофокусные параболические зеркальные антенны диаметром 1,8 м, снабженные защитными блендами, предназначенными для подавления отражений от земной поверхности. Ширина ДН – 4,5 град.

Передающее устройство РЛС выполнено на базе магнетрона с импульсной модуляцией в виде функционально законченного модуля.

Радиоприёмное устройство реализовано по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты и логарифмическим трактом ПЧ с динамическим диапазоном около 75 дБ.

Система цифровой обработки радиолокационной информации состоит из устройства аналогово-цифрового преобразования (АЦП) и сервера обработки радиолокационной информации. АЦП осуществляет дискретизацию сигнала с выхода приемника, с частотой 10 МГц и разрядностью 14 бит. Функции сбора обработки и хранения радиолокационной информации осуществляет сервер. Параметры РЛС ВЗ приведены в таблице.

Таблица

Основные технические характеристики РЛС ВЗ S диапазона

Рабочая частота	S диапазон
Импульсная мощность	0,5 кВт
Диаметр приемной и передающей антенн	1,8 м
Разрешение по высоте	60 м
Высотный диапазон зондирования:	
работа по атмосферным неоднородностям	до 5-6 км
работа по гидрометеорам	до 18-20 км

## 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ АТМОСФЕРЫ

Анализ годового цикла непрерывных радиолокационных измерений (01.05.2010г.-01.05.2011г.) проведенных в Харькове с использованием радиолокационной станции вертикального

зондирования S диапазона показал наличие большого числа отражений от локальных невидимых в оптическом диапазоне атмосферных структур. Источники рассеяния сигнала в большинстве случаев связаны с отражениями электромагнитных колебаний от конвективных термических неоднородностей атмосферы (КТН) – термиков.

Амплитудно-временная характеристика огибающей рассеянного сигнала, рис. 1, отображает динамику отражения электромагнитных колебаний от неоднородностей диэлектрической проницаемости нагретого объема воздуха, проходящего через диаграмму направленности антенной системы РЛС ВЗ.

Характерной особенностью эхо-сигнала от таких неоднородностей являются ступенчатая форма огибающей, крутые передний и задний фронт, наличие доплеровского смещения частоты. Поскольку конвективный термик находится под влиянием ветра, турбулентности и других факторов, возможна интерференция рассеиваемого сигнала, рис. 1.

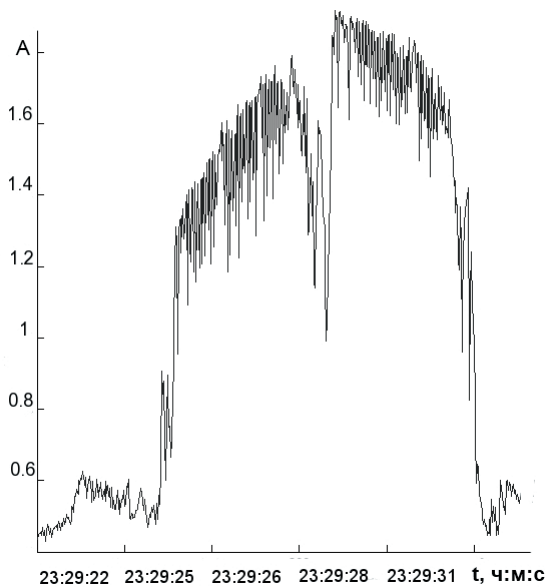


Рис. 1. Амплитудно-временная характеристика огибающей сигнала отраженного от КТН

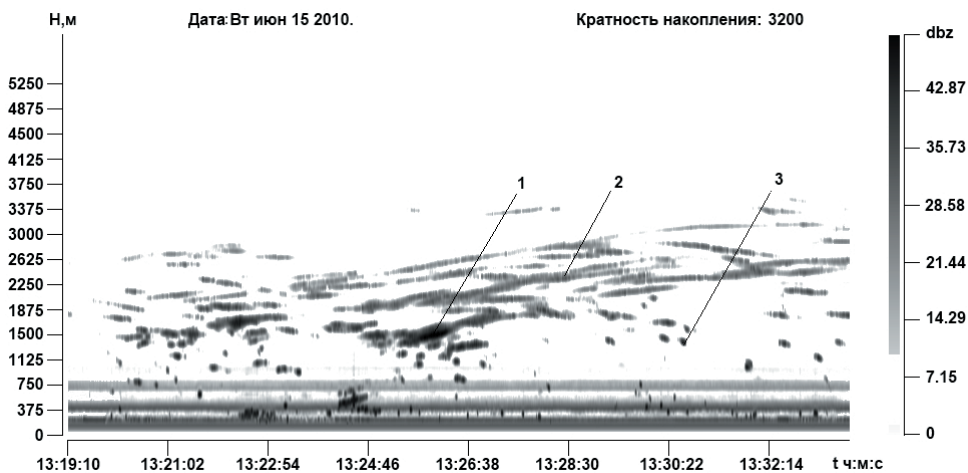


Рис. 2. Примеры регистрации отражений от КТН различных типов: 1 – ансамбль термиков, 2 – воздушная струя, 3 – изолированный термик

Типичный пример регистрации результатов радиолокационного зондирования в дневное время показан на рис. 2. Результаты приведены в виде высотно-временного поля, с яркостной шкалой в единицах отражаемости в пределах 0-60 дБ, шкала высот представлена в метрах, шкала времени – в формате часы-минуты-секунды.

Термические потоки образуются в нестабильных слоях и блокируются стабильными (в частности инверсиями). В случае устойчивой стратификации атмосферы термик замирает, совершая затухающие колебания. Численность термиков в ночной период наблюдения существенно увеличивается по сравнению с дневными наблюдениями.

Наблюдаются несколько основных форм конвективных элементов потока:

- изолированный термик приблизительно сферической формы с внутренней циркуляцией в виде вихревых колец, рис. 2, позиция 3;
- вертикальная или наклонная воздушная струя, вертикальный размер которой в несколько десятков раз превышает горизонтальный, рис. 2, позиция 2;

– конгломераты термиков – это слившиеся в процессе подъема в единый ансамбль изолированные термики, рис. 2, позиция 1.

Конфигурация поднимающегося конвективного элемента потока зависит от соотношения между временем тепловыделения  $t_{ТВ}$  подстилающей поверхности и характерным временем подъема нагретого воздуха до высоты зависания  $t_3$  вблизи уровня теплового равновесия в стратифицированной атмосфере. Если  $t_{ТВ} \gg t_3$ , то имеет место струйное течение, при обратном соотношении в атмосфере образуется объем конечных размеров – термик. Анализ результатов радиолокационных наблюдений отражений от КТН позволяет определить метеорологические и сезонные особенности текущей структуры атмосферы, при которых возникают благоприятные условия образования КТН в пограничном слое атмосферы и нижней части тропосферы. Суточная

зависимость численности и максимальной высоты КТН и связанных с ними метеопараметрами приведены на рис. 3.

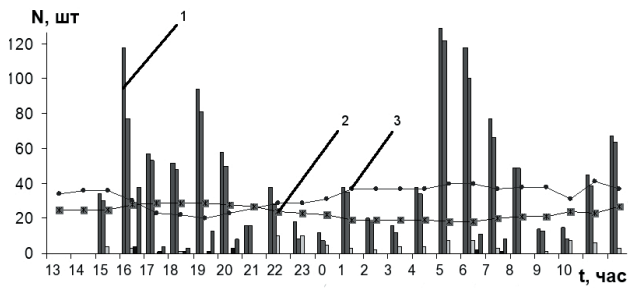


Рис. 3. Суточная зависимость количества КТН, температуры, влажности воздуха; 1 – численность; 2 – температура воздуха; 3 – относительная влажность воздуха

Зависимость численности носит двумодальный характер с выраженным ночным и дневным максимумами соответственно в 05-06 часа и 15-16 часов.

Дневной период формирования термиков начинается с восходом солнца, который сопровождается неравномерным нагревом поверхности

земли, при этом формируются термические потоки, активность которых нарастает и численность КТН достигает максимума к середине второй половины дня. С приближением заката солнца температура воздуха у земли начинает медленно уменьшаться, при этом уменьшается и численность КТН.

После захода солнца начинается ночной период формирования термиков, когда происходит выхолаживание приземного слоя воздуха и начинается формирование термических потоков в виде всплывающих термиков, рис. 4. Средняя скорость подъема всплывающих термиков составляет около 2 м/с. К восходу солнца численность ночных термиков снижается и при выравнивании температуры почвы и воздуха численность термиков падает до минимальной. При этом на регистрациях наблюдаются тонущие термики, рис. 5.

На рис. 6, рис. 7 приведены графики: годового хода температуры и выборка среднесуточных значений численности наблюдаемых КТН (в поле графиков рис. 7 а, б серым тоном выделены периоды проведения измерений).

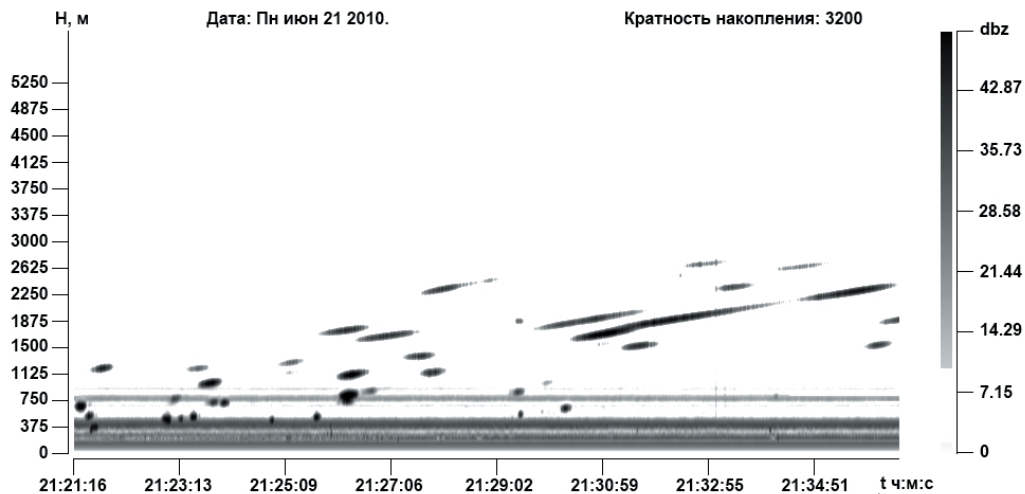


Рис. 4. Высотно-временная структура сигналов рассеянных от КТН. Подъем ансамбля всплывающих термиков в начале ночного периода их формирования

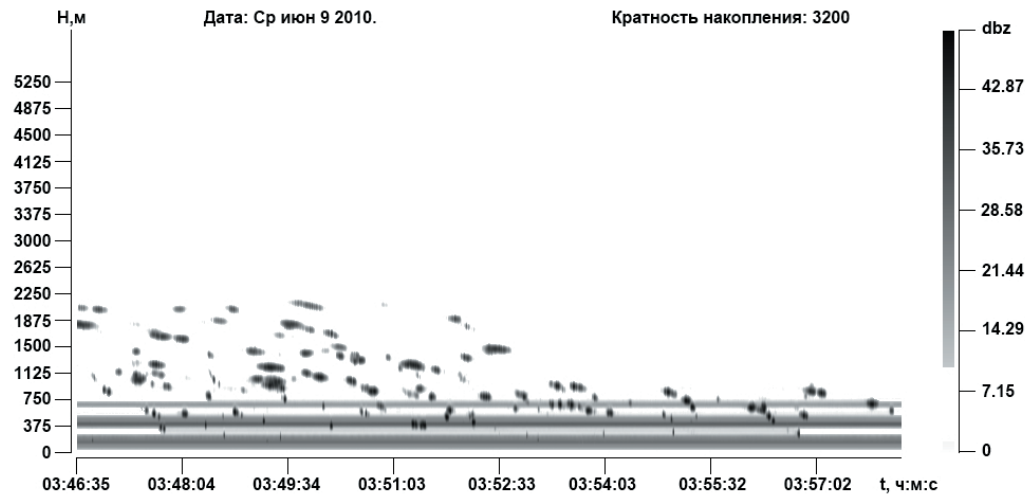


Рис. 5. Высотно-временная структура сигналов рассеянных КТН. Опускание ансамбля тонущих термиков в конце ночного периода их формирования



Сезонный пик численности наблюдаемых КТН приходится на май – июнь, что объясняется благоприятным для конвективных процессов соотношением температуры и влажности. В июле – августе наблюдался небольшой спад численности радиолокационных отражений от КТН, вызванный низкой влажностью воздуха. Начиная с сентября, наблюдается постепенный спад активности вплоть до полного ее исчезновения в конце ноября. Следует отметить, что радиолокационные отражения от КТН наблюдаются и в зимнее время года с отрицательными температурами, однако их появление эпизодично и связано с благоприятными погодными условиями, обеспечивающими необходимый для образования термиком прогрев подстилающей поверхности.

В первой половине марта образование КТН начинает носить регулярный устойчивый характер. Однако общая численность радиолокационных отражений от КТН заметно ниже, чем в теплое время года.

Анализ наблюдаемой зависимости относительной численности КТН от времени суток и температуры, представленной на рис. 8, показывает, что в основном отражения от КТН присутствуют в ночное время во всем диапазоне положительных температур, дневной пик относительной численности возможен в более узком диапазоне температур воздуха.

Ночной максимум численности КТН рис. 9 в основном определяется отрицательной скоростью изменения температуры воздуха, то есть

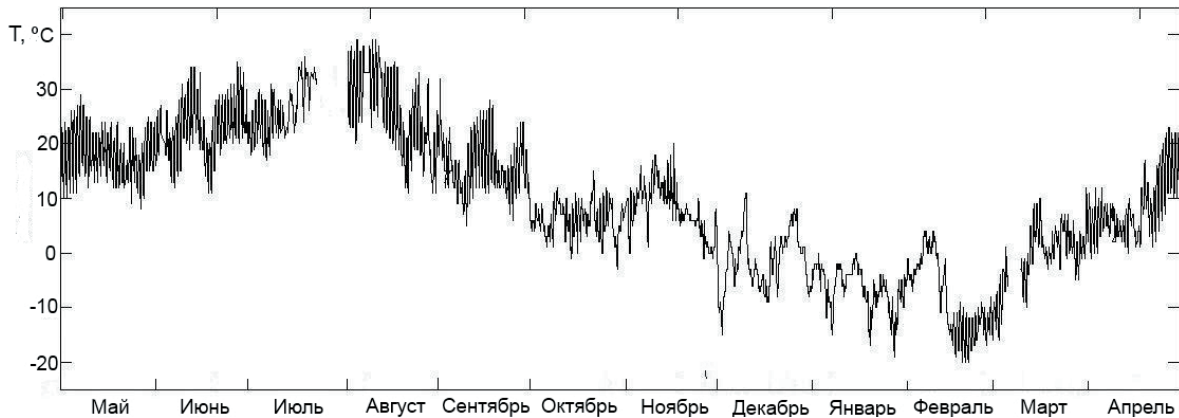
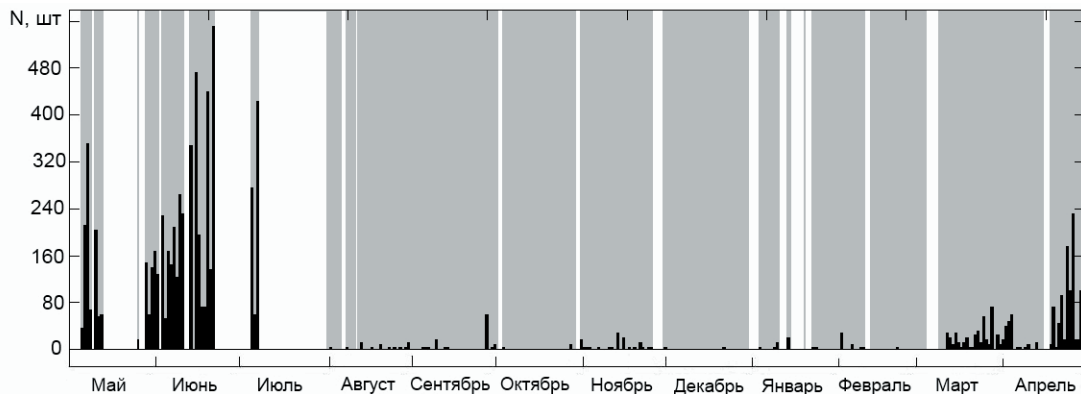
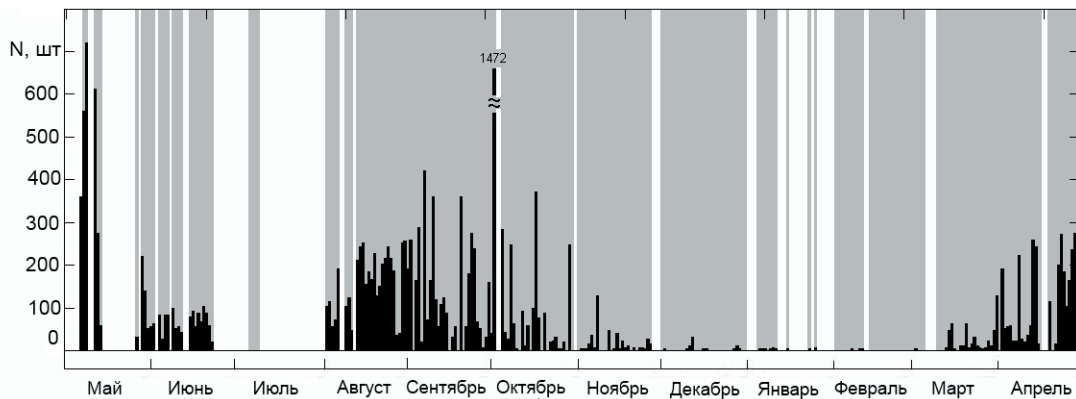


Рис. 6. Годовой ход температуры приземного воздуха



а



б

Рис. 7. Часовые значения численности наблюдаемых конвективных термиком для дневного (а) и ночного (б) максимумов

подъёмная сила термических потоков обеспечивается разницей температур нагретой в дневное время подстилающей поверхностью и остывающей ночной атмосферой.

Дневной максимум численности сопровождается положительной скоростью изменения температуры приземного воздуха (рис. 9), при этом термические потоки подпитываются энергией за счёт неравномерно нагретой подстилающей поверхности, температура приземного воздуха остаётся ниже температуры отдельных участков подстилающей поверхности.

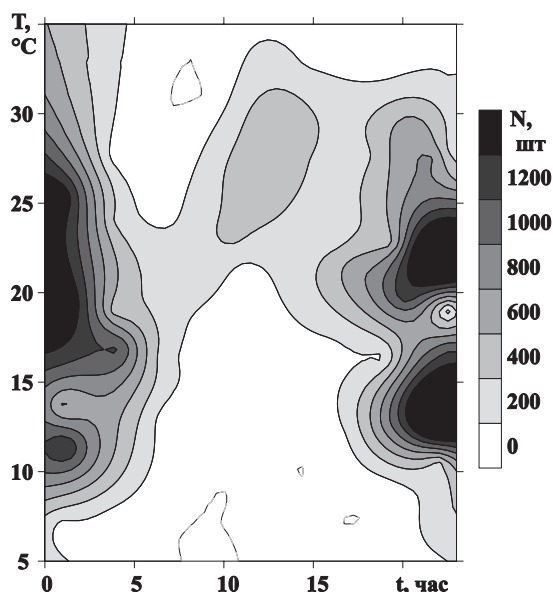


Рис. 8. Изолинии поверхности отображающей зависимость относительной численности КТН от времени суток и температуры приземного воздуха

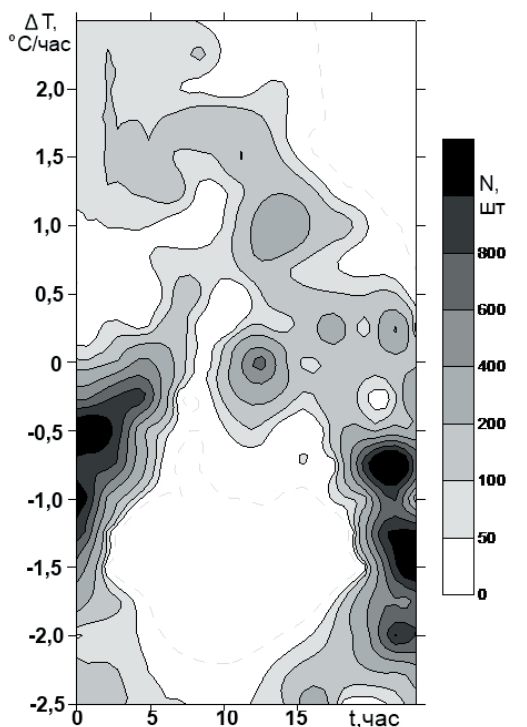


Рис. 9. Изолинии поверхности отображающей зависимость относительной численности КТН от времени суток и скорости изменения температуры приземного воздуха

Поведение наблюдаемой зависимости максимальной высоты отражений от КТН от времени суток и температуры приземного воздуха и изменения температуры приземного воздуха во многом повторяют характер аналогичных зависимостей для численности КТН.

Регистрации КТН в основном наблюдаются в области положительных температур приземного воздуха при отрицательной скорости изменения температуры приземного воздуха (ночной период), ярко выраженной зависимости максимального количества регистраций КТН от относительной влажности воздуха не наблюдается, что иллюстрируется на рис. 10. Повышение влажности воздуха приводит к увеличению градиента диэлектрической проницаемости на сферической границе термика, и соответственно к повышению его радиолокационной заметности. Наблюдаемая зависимость часовой численности КТН от изменения температуры приземного воздуха и температуры приземного воздуха имеет выраженный экстремум, рис. 11.

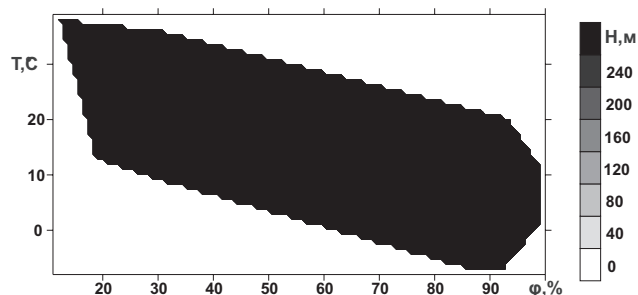


Рис. 10. Изолинии поверхности отображающей зависимость часовой численности КТН от температуры приземного воздуха и относительной влажности воздуха

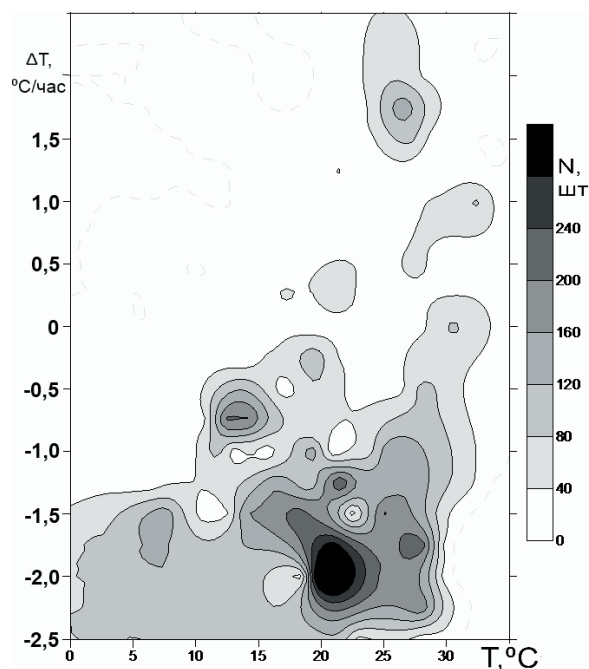


Рис. 11. Изолинии поверхности отображающей зависимость часовой численности КТН от скорости изменения температуры приземного воздуха и температуры приземного воздуха

Как отмечается рядом исследователей [3,4], отражения от термиков в основном наблюдаются при низких значениях скорости приземного ветра в пограничном слое атмосферы. Полученные в данной работе результаты не показали серьезных ограничений на численность отражений от КТН при скоростях приземного ветра до 12 м/с, однако следует отметить, что большие значения скорости ветра в анализируемый период практически отсутствовали.

Изучение естественных вариаций окружающей среды в пределах пограничного слоя атмосферы является важным фактором прогнозирования переноса загрязняющих веществ в атмосфере. Для реализации этого прогнозирования необходимо располагать мезомасштабной моделью пограничного слоя атмосферы, включающей описание переноса аэрозоля, которые можно получить на основе статистических характеристик радиолокационных сигналов отраженных от КТН. Далее представлены статистические характеристики отражений от КТН за одни сутки 11-12.05.2010.

Распределение высот КТН за анализируемый интервал времени рис. 12, имеет мультимодальное распределение с модами на высотах 1200 м, 2300 м и 2900 м. В основном КТН расположены на высотах до 2000 метров. В зависимости от метеоусловий максимум концентрации КТН может находиться и на других высотах, однако, изменение этих высот незначительное.

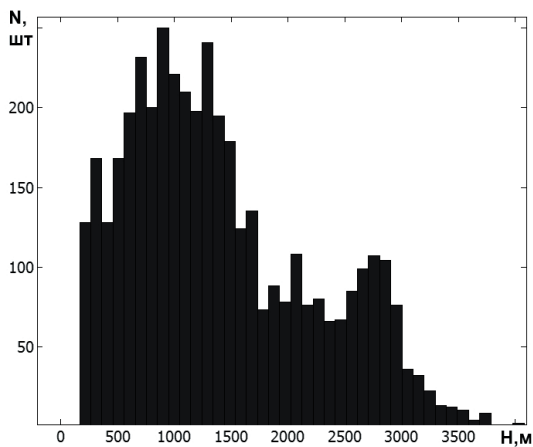


Рис. 12. Распределение отражений от КТН по высотам

Длительность отражения от КТН, рис. 13, зависит от ряда факторов: параметров антенной системы, высоты КТН, скорости приземного ветра. Распределение длительности отражений от КТН при уровне значимости 0,05 соответствует бета-распределению. Математическое ожидание и дисперсия длительности отражений соответственно равны 12.2 и 10.1 секунд.

Распределение толщины отражающей области КТН, рис. 14, при уровне значимости 0,05 соответствует нормальному распределению. Математическое ожидание и дисперсия толщины отражающей области КТН соответственно равны 140.4 и 38.1 м.

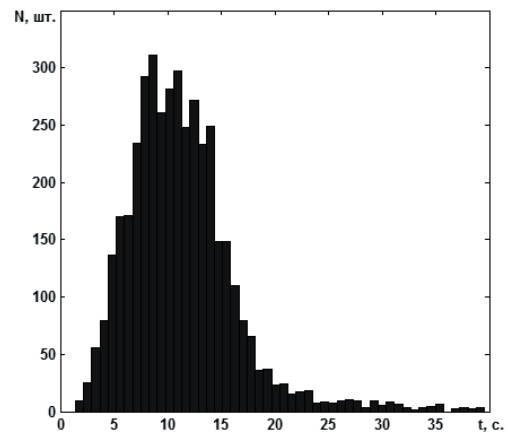


Рис. 13. Распределение длительности отражений от КТН

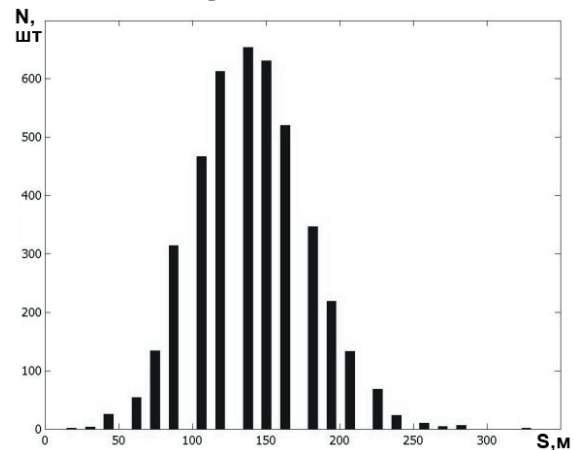


Рис. 14. Распределение толщины отражающей области КТН

На рис. 15 приведено поле корреляции зависимости длительности регистрации отражений от высоты.

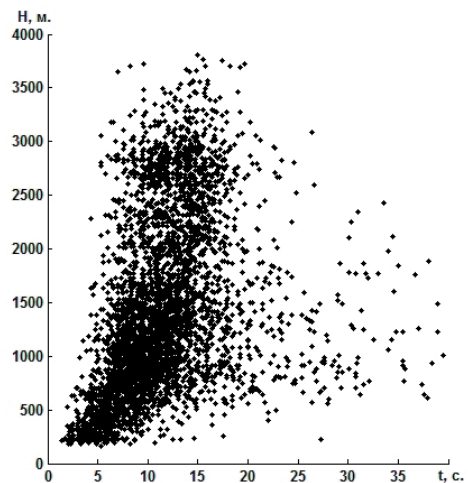


Рис. 15. Поле корреляции зависимости длительности отражений от высоты

## ВЫВОДЫ

В результате обработки годового цикла радиолокационных наблюдений термиком в нижнем слое тропосферы, проведенных на РЛС ВЗ S-диапазона, получены следующие результаты.

Выявлены закономерности суточного распределения активности этих явлений. Зависимость

численности носит двумодальный характер с выраженным ночным и дневным максимумами соответственно в 02–03 часа и 14–15 часов.

Определены величины метеопараметров, при которых возникают благоприятные условия образования КТН в нижней части тропосферы. Обнаружена тесная связь численности КТН и изменения температуры воздуха во времени. Численность КТН имеет выраженную зависимость от температуры и скорости изменения температуры во времени – наибольшая численность наблюдается при  $+20$ – $+25$  °C и падении температуры на  $0,3$ – $0,5$  °C час.

Высота слоя существования КТН практически не превосходит 4000 метров. В основном КТН наблюдаются на высотах до 2000 метров.

Представленные в работе экспериментальные результаты радиолокационных исследований условий существования и физических характеристик локальных конвективных термиков имеют большое значение для экологического мониторинга атмосферных процессов.

#### Литература.

- [1] Baldwin M.W. Radar reflections from the lower atmosphere // *Proc. of the Institute of Radio Engineers* 1948. – № 36. – P. 363.
- [2] Colwell R. C., Friend A. W. The Lower Ionosphere // *Phys. Rev.* 1936. – № 50 – P.632.
- [3] Atlas D., Possible key to dilemma of meteorological “Angel echo’s”. // *Journal of Meteorology*, 1960. – № 17. – P. 95.
- [4] Черников А.А. Радиолокационные отражения от ясного неба. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. – 45 с.
- [5] Crawford A.B. Radar reflections in the lower atmosphere. // *Proc. Inst. of Radio Eng.*, 1949. – № 37. – P. 404.
- [6] Русаков Ю.С. Динамика вертикального движения турбулентного вихревого кольца // *Известия Ан. Физика атмосферы и океана*. 1997. – Т. 37, № 6. – С. 1–11.
- [7] Browning K. A. Structure of the atmosphere in the vicinity of large-amplitude Kelvin-Helmholtz billows. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1972. – №98. – P. 685.
- [8] Atlas, D., Radar in Meteorology. Amer. Meteor. Soc., 1990. – P. 806.
- [9] Atlas D., Metcalf J.L., Richter J.H., Gossard E.E. The Birth of “CAT” and microscale turbulence. *J.Atmos. Sci*, 1970. – № 27. – P. 903.

Поступила в редколлегию 18.01.2012



**Олейников Владимир Николаевич**, к.т.н., профессор каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Научные интересы: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.



**Евсеев Дмитрий Борисович**, к.т.н., с.н.с. каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Научные интересы: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.



**Юдин Станислав Владимирович**, аспирант каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Научные интересы: Метеорологическая радиолокация.



**Литвин-Попович Андрей Игоревич**, к.т.н., доцент каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Научные интересы: цифровая обработка радиолокационных сигналов.



**Гарячий Дмитрий Алексеевич**, аспирант каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Научные интересы: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.

УДК 621.396.9

**Радіолокаційні спостереження відбиттів від атмосферних неоднорідностей в тропосфері, обумовлених терміками** / В.М. Олейников, Д.Б. Євсеев, С.В. Юдин, Д.О. Гарячий, А.І. Литвин-Попович // *Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал.* – 2012. Том 11. № 1. – С. 15–22.

У роботі розглядаються результати радіолокаційних спостережень конвективних терміків в нижній тропосфері. Проведений аналіз добового і річного ходу чисельності терміків. Досліджені закономірності появи терміків від метеопараметрів. Показано, що чисельність терміків має виражену залежність від температури і зміни температури в часі. Отримані статистичні характеристики радіолокаційних відбиттів від терміків.

**Ключові слова:** радіолокаційні дослідження, РЛС вертикального зондування, діелектрична проникність, термічний конвективний процес, механізм утворення, амплітудно-часова характеристика, залежність, відносна чисельність.

Табл. 1. Лл. 15. Бібліогр.: 9 найм.

UDC 621.396.9

**Radar observations of reflections from atmospheric inhomogeneities in the troposphere due to thermals** / V.N. Oleynikov, D.B. Evseev, S.V. Yudin, D.A. Garyachiy, A.I. Litvin-Popovich // *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.* – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 15–22.

The paper considers the results of radar observations of convective thermal inhomogeneities in the lower troposphere. An analysis of diurnal and annual variation of the number of convective thermal inhomogeneities is carried out. The dependence of the appearance of thermals upon meteorological parameters is researched. It is shown that the quantity of convective thermal inhomogeneities has a pronounced dependence on temperature and temperature changes in time. Statistical characteristics of radar reflections from convective thermal inhomogeneities are obtained.

**Keywords:** radar observations, vertical sounding radar, angel-echoes, dielectric constant, convective thermal process, mechanism of formation, amplitude-time characteristic, relative quantity.

Tab. 1. Fig. 15. Ref.: 9 items.