

М.Г. Дудник, А.Ю. Канухина, А.А. Власов

**РАСЧЕТ ИНДЕКСОВ КОНВЕКЦИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РАДИОЗАТМЕННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ СПУТНИКОВ COSMIC/FORMOSAT**

M.G. Dudnic, A.Yu. Kanukhina, A.A. Vlasov

**CONVECTION INDICES DERIVED FROM COSMIC/FORMOSAT
RADIO OCCULTATION SOUNDING DATA**

В статье описывается диагностика явлений глубокой конвекции для Санкт-Петербурга с помощью данных эксперимента COSMIC по радиозатменному зондированию. Для оценки состояния атмосферы используются четыре индекса: LI (Lifted Index); K; Total totals; DCI (Deep Convective Index) и рассматриваются вертикальные профили статической устойчивости атмосферы G и показателя Фальковича χ . Продемонстрирован метод обработки данных эксперимента COSMIC и показан способ получения вертикального профиля температуры из данных о профиле индекса рефракции.

Ключевые слова: данные радиозатменного зондирования COSMIC/FORMOSAT, индексы конвекции, LI, TT, K индекс, показатель Фальковича, статическая устойчивость атмосферы, индекс рефракции, DCI.

The diagnostics of the deep convection for Saint-Petersburg is described with the aid of convection indexes calculated using the experimental data of COSMIC radio occultation sounding. To estimate the state of the atmosphere we used 4 indexes: LI (Lifted Index); K; Total totals; DCI (Deep Convective Index) and plotted vertical profiles of the atmosphere static stability G and Falkovich index χ . The experimental data of COSMIC experiment and method of obtaining the vertical profile of the temperature from vertical profile of the refraction index are described.

Key words: radio occultation sounding, COSMIC/FORMOSAT data, indexes of convection, LI, TT, K index, Falkovich index, static stability of the atmosphere, refraction index, DCI.

Введение

Мощные конвективные процессы могут являться причиной сильных, разрушительных порывов ветра как горизонтальных, так и вертикальных, резких подъемов уровня воды в небольших водоемах, губительного для сельскохозяйственных культур крупного града. Явления мезомасштаба быстро развиваются, а имеющаяся сеть станций наблюдений не всегда позволяет их вовремя зарегистрировать [1, 2, 6, 18]. Развитие численных моделей прогноза погоды дает возможность получать данные о состоянии атмосферы заблаговременно и с хорошим пространственным разрешением.

Для оценки состояния атмосферы использовались четыре различных индекса конвекции:

- LI (Lifted Index),
- K,

- Total totals,
- DCI(Deep Convective Index),

а также строились вертикальные профили параметра статической устойчивости атмосферы Γ и показателя Фальковича.

Одни из вышеперечисленных величин характеризуют степень неустойчивости атмосферы, другие отражают степень готовности атмосферы к развитию конвекции или несут информацию о том, насколько сильным будет конвективное явление [8].

Целью данного исследования является использование данных эксперимента COSMIC по радиозатменному зондированию для диагностики явлений глубокой конвекции на северо-западе России. Требуется выяснить, насколько точно данные по радиозатменным наблюдениям позволяют анализировать конвективные процессы, а значит, будет ли полезным их усвоение в прогностических моделях.

Индексы конвекции, наиболее часто используемые в метеорологической практике и применимые к данным эксперимента COSMIC [3, 7] описаны в следующем разделе.

В заключении сформулированы основные выводы по произведенным расчетам и приведено заключение о качестве диагностических характеристик индексов конвекции, рассчитанных по данным радиозатменных наблюдений.

1. Индексы и профили, выбранные для исследования

Первым и наиболее важным условием, необходимым для развития глубокой конвекции, является статическая неустойчивость атмосферы. Если атмосфера устойчива или относительно неустойчива, то глубокая конвекция не будет развиваться. Следовательно, необходимо рассчитать параметр, определяющий степень устойчивости или неустойчивости воздуха. Это может быть параметр статической устойчивости атмосферы Γ . Если воздух устойчив, то других условий не требуется, в любом случае конвекция развиваться не будет. Однако неустойчивость сама по себе не является гарантией того, что конвективные явления будут развиваться. Более того, она даже не является гарантией того, что какая-либо мелкая конвекция будет иметь место. Условие $\Gamma \leq -1$ показывает только, что атмосфера обладает основной характеристикой для развития глубокой конвекции. Конвекция будет развиваться, когда атмосфера не только статически неустойчива, но также конвективно неустойчива. Согласно исследованиям Фальковича [13, 9] для развития глубокой конвекции индекс конвективной неустойчивости должен быть $\chi \geq 1$, причем для нижнего уровня индекс должен быть больше, чем для верхнего, то есть $\chi_H > \chi_B$. Таким образом, роль этого параметра заключается в том, чтобы указать, готова ли условно неустойчивая атмосфера к разрешению неустойчивости.

Такой набор параметров позволяет разделить используемые в работе индексы на три группы:

- диагностические параметры, характеризуют готовность атмосферы к развитию конвекции (Γ , LI, K, DCI);
- индекс, играющий роль триггера в принятии решения о возникновении конвекции (χ);
- индекс, позволяющий определить интенсивность конвективного явления (ГТ).

При расчете индексов используются следующие базовые формулы.

Во-первых, рассмотрим индекс статической устойчивости атмосферы Γ_e

$$\Gamma_e = \frac{\theta(\theta_{eU} - \theta_{eL})}{\theta_e \cdot \Delta Z}, \quad (1.1)$$

где $\theta = T \cdot \left(\frac{1000}{P}\right)^{0.286}$; θ – потенциальная температура, К; θ_e – эквивалентная потенциальная температура, К; $\theta_e \approx \theta \cdot \exp(Lq_s C_p \cdot Tk)$; P – атмосферное давление, гПа; L – скрытая энергия конденсации; $L \approx 2.5 \cdot 10^6$ Дж/кг; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; $C_p \approx 10^3$ Дж/(кг·К); q_s – удельная влажность, кг/кг; Tk – температура частицы, адиабатически поднятой на уровень конденсации, °К;

$$\Gamma = \frac{\bar{\gamma}_e}{\gamma}, \quad (1.2)$$

где $\bar{\gamma}$ – средний влажноадиабатический градиент, равный 0,65 °/100 м. Благодаря формуле (1.2) появляется возможность работать с безразмерным индексом. Положительное его значение указывает на статическую устойчивость атмосферы, отрицательное – наоборот, на статическую неустойчивость. Статическая неустойчивость атмосферы является необходимым, но недостаточным условием для формирования опасных явлений. То есть атмосфера должна быть и конвективно неустойчивой. Для развития конвекции воздух должен быть насыщенным. Чтобы привести его в такое состояние, необходимо, например, понижение температуры воздуха на несколько градусов за 3–6 ч или конвергенция влаги, вызванная восходящими движениями воздуха или его орографическим подъемом.

Но возможно, что восходящие движения могут не успеть до своего собственного изменения привести воздух в насыщенное состояние, или влажность воздуха окажется недостаточной. Тогда необходимо оценить показатель Фальковича

$$\chi = \frac{\Delta Z_{кнс} - \Delta Z_3}{\Delta Z_3}, \quad (1.3)$$

где $\Delta Z_{кнс}$ – толщина конвективно-неустойчивого слоя; ΔZ_3 – толщина запи-

рающего слоя [18].

Для расчетов используются следующие формулы χ :

$$\chi = \frac{(\theta_{e850} - \theta_{e0})(\theta_{e850} - \theta_{e0})}{(\theta_{e850} - \theta_{e0})(\theta_{e0} - \theta_{e0})} - 1, \quad (1.4)$$

$$\theta_e = \theta \exp\left(\frac{2,5q_s}{T}\right), \quad (1.5)$$

$$q_s = \frac{3794,2}{P} 10^{\frac{7,62T}{241,9+T}}, \quad (1.6)$$

где T – температура воздуха, К; θ_e – эквивалентная потенциальная температура виртуально насыщенной атмосферы, К.

Положительные величины указывают на конвективную неустойчивость атмосферы, следовательно, на высокую вероятность развития конвекции, отрицательные – возможность появления только систем мелкой конвекции.

LI (Lifted Index) является характеристикой неустойчивости частицы, поднимающейся от земли до уровня 500 гПа с учётом вовлечения окружающего воздуха. Вычисляется по довольно сложным формулам (по фактическим или прогностическим аэрологическим данным). Формула для расчета Lifted Index [14]:

$$LI = T_c(500\text{mb}) - T_p(500\text{mb}), \quad (1.7)$$

где T_c – температура воздуха по Цельсию уровня 500 гПа; T_p – температура по влажной адиабате уровня 500 гПа;

$$T_p = -1 \cdot \frac{\ln(6.1078 \cdot E) \cdot 219.522 + 307.004}{\ln(6.1078 \cdot E) \cdot 0.556 - 9.59539}, \quad E = E_w - 0.35 \cdot (Td - T_w),$$

$$E_w = \frac{6.1078 \cdot \exp(9.5939T_w - 307.004)}{(0.556 \cdot T_w) + 219.522}, \quad T_d - \text{точка росы;}$$

$$T_d = \frac{237.7 \cdot \ln\left(\frac{es \cdot rh}{611}\right)}{7.5 - \ln\left(\frac{es \cdot rh}{611}\right)}, \quad Rh - \text{относительная влажность, проценты; } T_w - \text{тем-}$$

пература по влажной адиабате; e_s – парциальное давление водяного пара, Па.

Трактовка значений Lifted Index по различным источникам схожая, приведена в табл. 1 [15]:

Шкала соответствия значений LI с применениями в атмосферном состоянии

LI	Более 4	устойчивые атмосферные условия, глубокая конвекция не ожидается;
LI	От 2 до 4	возможны изолированные кучево-дождевые облака;
LI	От 0 до 2	грозы скорее всего не будут или редкие грозы (20–40 % площади);
LI	От 0 до –2	возможны грозы при наличии спускового триггера, например, атмосферного фронта, суточного нагрева подстилающей поверхности (50–70 % площади);
LI	От –2 до –4	грозы весьма вероятны (80–100 % площади);
LI	От –4 до –7	сильные грозы, ливни, град, возможны торнадо.

Однако низкое значение Lifted Index лишь одно из необходимых, но далеко не достаточное условие для формирования гроз. LI показывает, какая будет разница между температурой приземного воздуха, если его поднять на поверхность 500 гПа и фактической температурой окружающего воздуха на этой высоте, характеризуя таким образом нестабильность в атмосфере. Чем больше нестабильность, тем интенсивнее будет развитие грозовой облачности. Но для того, чтобы гроза начала формироваться, нужно сочетание ряда факторов: нужен теплый и влажный воздух и триггер, например, атмосферный фронт. Если воздух сухой, холодный, и поблизости нет атмосферных фронтов, то при любом значении LI, никаких гроз не будет.

Другой, использованный в данной работе, показатель возможности возникновения гроз, основанный на комбинации вертикального температурного градиента, влагосодержания нижней атмосферы и толщины слоя, содержащего водяной пар, называется K индекс. Вертикальный градиент температуры параметризуется разностью температур окружающей среды на уровнях 850 и 500 гПа, значение точки росы на уровне 850 гПа дает сведения о влагосодержании нижних слоев атмосферы, вертикальная протяженность слоя влажного воздуха представлена разностью между температурой и точкой росы на уровне 700 гПа [15].

Также его можно использовать для определения возможности наводнений: высокие значения K индекса (более 35) соответствуют возможности развития многочисленных гроз, которые могут способствовать критическому повышению уровня водоемов [15]. Пороговые значения его меняются в зависимости от времени года, географического положения и синоптической ситуации.

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d,850} - (T_{700} - T_{d,700}), \quad (1.8)$$

Шкала соответствия значений K с применениями в атмосферном состоянии [16]

K	более 35	Многочисленные грозы
K	от 31 до 35	Рассредоточенные явления глубокой конвекции
K	от 26 до 30	Территориально удаленные грозы
K	от 20 до 25	Изолированные грозы
K	менее 20	Отсутствие конвективных явлений

Для оценки мощности конвективных явлений используется параметр TT (Total Totals), который представляет собой комбинацию так называемых VT

(Vertical Totals), или разница температуры воздуха на уровнях 850 и 500 гПа и СТ (Cross Totals), или разница температур точки росы на уровне 850 и воздуха на 500 гПа.

$$TT = (T_{850} - T_{500}) + (Td_{850} - T_{500}), \quad (1.9)$$

Таблица 3

Шкала соответствия значений TT с применениями в атмосферном состоянии [17]

TT	Менее 44	Развитие конвекции маловероятно
TT	От 44 до 50	Возможны грозы
TT	От 51 до 52	Изолированные грозы
TT	От 53 до 56	Рассредоточенные явления глубокой конвекции
TT	Более 56	Изолированные редкие грозы

Хотя параметр TT используется для оценки мощности развития конвективной неустойчивости, необходимо заметить, что он не учитывает сдвиг ветра напрямую, с его помощью невозможно учесть наличие инверсии, блокирующей развитие конвекции. Если влагосодержащий слой находится ниже уровня 850 гПа, то показатель TT будет сверхустойчивым. Хорошо зарекомендовал себя для территорий с плоским или незначительно варьирующимся рельефом и, конечно же, отличается сильной сезонной и географической зависимостью.

Индекс глубокой конвекции DCI(Deep Convective Index) сочетает в себе характеристики эквипотенциальной температуры на уровне 850 гПа и степени неустойчивости атмосферы:

$$DCI = T_{850} + Td_{850} - LI. \quad (1.10)$$

Это достаточно новый параметр, для него еще не разработан точный перечень пороговых значений, но по приближенным оценкам [17] величине DCI 30 и более соответствуют развитые грозы. Ось горизонтального распределения высоких значений DCI может быть полезна для локализации мест развития грозовых явлений и мощных восходящих воздушных потоков. Представляется интересным проанализировать поведение параметра DCI для территории Санкт-Петербурга.

2. Данные эксперимента COSMIC/FORMOSAT

Локальная погода формируется как результат взаимного влияния местных условий, характера циркуляции и мезомасштабных явлений, к которым относятся, например, мощные конвективные явления. Опасность интенсивных конвективных процессов заключается в том, что они могут сопровождаться разрушительными порывами ветра, горизонтальными и вертикальными, резкими подъемами уровня воды в небольших водоемах, крупным градом, смерчами. Поэтому достоверное и заблаговременное определение вероятности развития мощной конвекции так значимо для деятельности человека. Явления мезомасштаба быстро развиваются, а имеющаяся сеть станций наблюдений не всегда позволяет их уловить. Одним из путей решения данной проблемы является использование технологии радиозатмения (radio occultation). В основе данной технологии лежит тот факт, что распространение радиосигнала через нейтральную

атмосферу сопровождается уменьшением фазовой скорости радиоволн. Это связано с наличием в атмосфере молекул азота, кислорода и водяного пара. Под действием внешней электромагнитной волны эти молекулы создают дополнительные токи поляризации. В результате, суммарные токи отличаются от токов в вакууме. Фазовая скорость радиоволн напрямую зависит от концентрации молекул. Следовательно, измерения времени прохождения радиосигнала между передатчиком и приемником дают информацию об интегральных свойствах атмосферы вдоль траектории распространения сигнала.

В случае, когда передатчик и приемник располагаются на спутниках, для решения обратной задачи дистанционного зондирования атмосферы, то есть для определения из данных измерений времени прохождения сигнала вертикальных профилей параметров атмосферы (температуры воздуха, атмосферного давления, парциального давления водяного пара), из данных об угле рефракции с помощью преобразования Абеля получается вертикальный профиль показателя преломления, затем из профиля показателя преломления получают профили температуры и атмосферного давления (из уравнения статики) и парциального давления водяного пара. Ограничением данного метода является трудность или невозможность определения профилей метеорологических параметров ниже 5–7 км. Это связано с наличием в нижних слоях тропосферы молекул водяного пара.

Общая схема радиозатменного зондирования атмосферы состоит из следующих этапов:

1. Измерение амплитуды и фазы сигнала;
2. Расчет углов рефракции;
3. Расчет вертикального профиля показателя преломления;
4. Расчет вертикальных профилей метеорологических параметров. [5, 19, 12, 10, 11].

Измеряемый сигнал можно представить в виде:

$$U(t) = A(t) \cdot \sin[ikL - i2\pi ft + C(t) \cdot \pi + \varphi(t)], \quad (2.1)$$

где $U(t)$ – принимаемый радиосигнал; $A(t)$ – амплитуда принимаемого сигнала; k – волновое число; L – длина фазового пути от передатчика до приемника; f – частота электромагнитных волн; t – время; $C(t)$ – дальномерный код (0 или 1); $\varphi(t)$ – изменение фазы сигнала за счет распространения в атмосфере.

Амплитуда принимаемого сигнала $A(t)$ определяется условиями распространения в атмосфере, фаза же сигнала модулирована как в результате распространения в атмосфере, так и дальномерным кодом $C(t)$. Приемник радиосигнала производит измерение двух компонент радиосигнала.

Индекс рефракции зависит от параметров состояния атмосферы следующим образом:

$$N = 0.776 \frac{P}{T} + 3730 \frac{e}{T^2}, \quad (2.2)$$

где $N = (n - 1) \cdot 10^6$ – индекс рефракции, N ед.; n – показатель преломления; P – атмосферное давление, Па; T – температура воздуха, К; e – парциальное давление водяного пара, Па.

Из данных о профиле индекса рефракции может быть получен вертикальный профиль температуры воздуха при задаваемом профиле влажности воздуха, полученном из независимых измерений:

$$T = \frac{0.776 \cdot P + \sqrt{0.602 \cdot P^2 + 14920 \cdot N \cdot e}}{2 \cdot N}. \quad (2.3)$$

Данные о содержании водяного пара можно получать при зондировании при углах места навигационного спутника более примерно 10 градусов. Следует учитывать, что при таких малых углах места происходит осреднение по значительным объемам атмосферы и становится существенной горизонтальная неоднородность поля влажности.

Таким образом, видно, что характеристики влажности в пограничном слое атмосферы, полученные в результате пересчета из показателя преломления данных радиоокультации, являются осредненными по объему и несут в себе ошибки пересчета и аппроксимации.

Проект CHAMP [4] убедительно показал возможности технологии радиозатемнения, и в 2006 г. были запущены спутники проекта COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate, созвездная система наблюдений для метеорологии, ионосферы и климата). В настоящий момент проект успешно осуществляется Национальной Космической Организацией (Тайвань) и Университетской Корпорацией Исследования Атмосферы (США) – UCAR.

3. Результаты

3.1. Рассчитанные индексы

Табл. 4 содержит все рассчитанные значения индексов. В табл. 5 приведены сводные данные о значениях параметров конвекции.

Таблица 4

Lifted Index, K index, Total totals, DCJ

№ п/п	№, дн	Дата	Нижняя имеющаяся высота (COSMIC), км	Наблюдения (гроза), АМЦ Пулково	LI	K index	Total totals	DCI
			время зондирования, GMT(+3)					
			миссия /спутник					
			Координаты зондирования					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	24	04.05	0,8	нет грозы	0,7	-	-	-21,6
			22–34					
			mission G07 C006					
			59,37 – 59,42 с.ш. 29,42 – 28,00 в.д.					

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	125	05.05	2,5	гроза	0,4	-	-	-
			00-19					
			mission G14 C006					
			58,00 – 58,49 с.ш. 29,76 – 28,85 в.д.					
7	125	05.05	3,8	Гроза	1,1	35	44,2	8
			5-17					
			mission G07 C006					
			61,99 – 61,24 с.ш. 30,37 – 30,01 в.д.					
10	147	27.05	5,5	гроза	1,5	11	36	3,9
			22-18					
			mission 100 C001					
			59,76 – 58,59 с.ш. 33,98 – 33,12 в.д.					
13	148	28.05	1,1	гроза	1,1	36	87,1	7,1
			16-21					
			mission G03 C002					
			58,58 – 59,22 с.ш. 28,99 – 29,71 в.д.					
16	150	30.05	2,3	гроза	2,3	-	-	-
			17-43					
			mission G0 C006					
			61,5 – 61,3 с.ш. 33,9 – 32,2 в.д.					
19	159	08.06	0,7	гроза	2,2	11,9	42,7	6,9
			8-07					
			mission G0 C001					
			61,6 – 59,6 с.ш. 31,1 – 31,5 в.д.					
22	159	08.06	3,1	гроза	0,6	-	-	-
			23-42					
			mission G0 C002					
			61,6 – 61,1 с.ш. 34,0 – 33,3 в.д.					
25	159	08.06	0,2	гроза	1,5	4,1	38	5,3
			17-37					
			mission G0 C003					
			62,0 – 61,4 с.ш. 32,5 – 31,6 в.д.					
28	166	15.06	0,8	Гроза в преды- дущий день	1,4	19,5	44,9	-1,1
			17-40					
			mission G0 C001					
			61,3 – 60,3 с.ш. 29,8 – 29,2 в.д.					

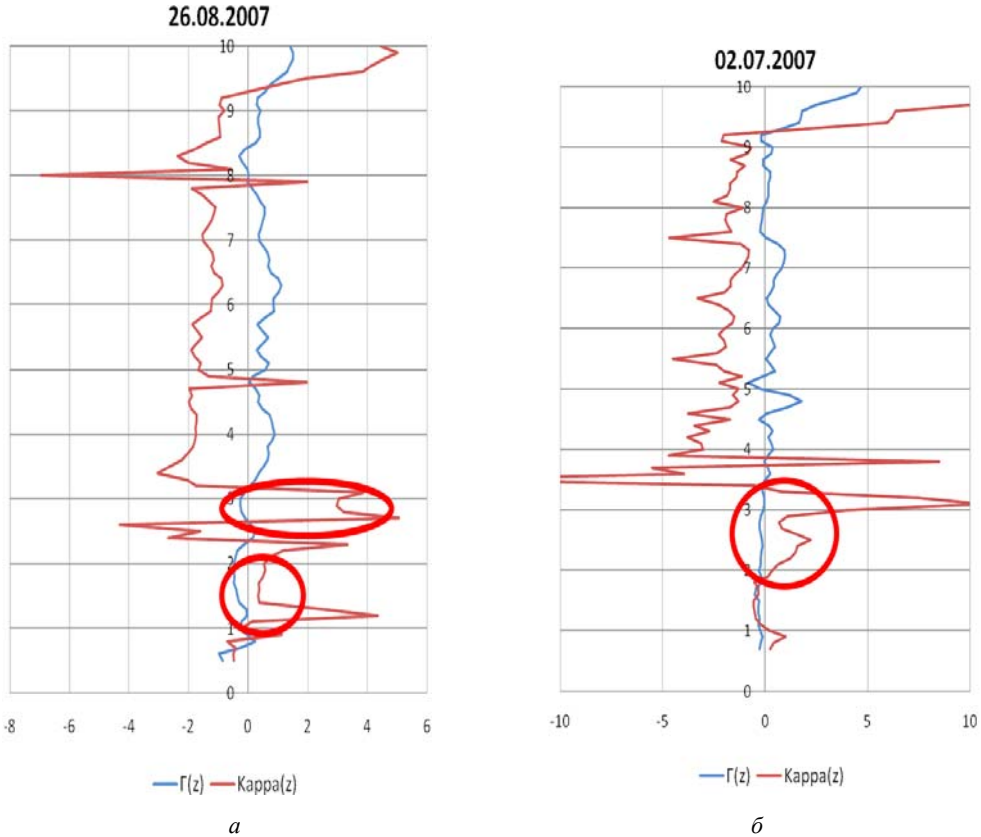
Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
31	170	19.06	1,7	гроза	1,2	-	-	-
			16-47					
			mission G0 C002					
			61,1 – 60,8 с.ш. 30,8– 29,0 в.д.					
34	171	20.06	0,2		1,0	20,9	43,4	-1,2
			18-17					
			mission G0 C002					
			61,8 – 61,3 с.ш. 29,5 – 28,8 в.д.					
37	172	21.06	2,5	гроза	1,0	-	-	-
			15-53					
			mission G0 C002					
			60,0 – 59,9 с.ш. 33,9 – 33,0 в.д.					
40	183	02.07	0,5	гроза	1	28,6	53,3	11,5
			11-05					
			mission G0 C002					
			61,23 – 61,1 с.ш. 28,8 – 28,0 в.д.					
43	183	02.07	0,7	гроза	1,0	27,2	52,8	10,1
			15-58					
			mission G0 C007					
			61,5 – 61,1 с.ш. 30,0 – 28,0 в.д.					
46	184	03.07	1,8	гроза	0,8	-	-	-
			5-18					
			mission G0 C001					
			59,0 – 58,7 с.ш. 34,0 – 32,6 в.д.					
49	185	04.07	0,2	гроза	2,7	19,4	45,5	11,1
			10-17					
			mission G0 C001					
			61,8 – 61,1 с.ш. 33,4 – 32,0 в.д.					
52	186	05.07	3,2	Нет грозы	2,6	-	-	-
			5-09					
			mission G0 C004					
			58,9 – 58,4 с.ш. 34,0 – 33,4 в.д.					
55	188	07.07	0,2	гроза	-0,1	30,8	51,4	14,5
			11-11					
			mission G0 C004					
			60,6 – 59,8 с.ш. 32,2 – 30,8 в.д.					

1	2	3	4	5	6	7	8	9
58	195	14.07	1,2	гроза	1,7	27,6	53,3	13,8
			15-31					
			mission G0 C004					
			59,8 – 59,1 с.ш. 33,4 – 32,3 в.д.					
61	229	17.08	1,0		0,1	27,2	44,3	21,7
			01-31					
			mission G0 C003					
			61,5 – 61,3 с.ш. 30,5 – 29,2 в.д.					
64	229	17.08	1,7		0,6	-	-	-
			7-50					
			mission G0 C006					
			61,6 – 60,7 с.ш. 32,4 – 31,2 в.д.					
67	234	22.08	0,4	гроза	0	33,4	51,8	22,2
			4-10					
			mission G0 C004					
			60,7 – 59,6 с.ш. 33,1 – 31,8 в.д.					
79	237	25.08	0,9	гроза	3,4	26	43,4	18,6
			00-52					
			mission G0 C004					
			58,2 – 58,0 с.ш. 29,8 – 28,2 в.д.					
82	237	25.08	3,3	гроза	0,1	-	-	-
			15-57					
			mission G0 C001					
			61,0 – 60,7 с.ш. 28,5 – 28,0 в.д.					
113	238	26.08	0,5	гроза	2,7	21,8	45,2	9,3
			2-21					
			mission G0 C004					
			60,6 – 59,8 с.ш. 31,8 – 30,7 в.д.					
117	238	26.08	0,2	гроза	2,8	23,9	42,3	10,4
			1-10					
			mission G0 C005					
			60,4 – 59,8 с.ш. 33,3 – 32,8 в.д.					
120	241	29.08	0,1	гроза	0,7	24,6	53,1	0,9
			4-23					
			mission G0 C004					
			61,2 – 60,0 с.ш. 31,,- – 30,2 в.д.					

Анализ всех полученных индексов

Индекс	Значение	Среднее	Минимум	Максимум
LI	0,7; 0,4; 1,1; 1,5; 1,1; 2,3; 2,2; 0,6; 1,5; 1,4; 1,2; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 0,8; 2,7; 2,6; -0,1; 3,4; 0,1; 2,7; 2,8; 0,7; 1,7; 0,1; 0,6; 0,0	1,2	-0,1	3,4
K	3,8; 35,; 11; 36; 11,9; 4,1; 19,5; 20,9; 28,6; 27,2; 19,4; 30,8; 27,6; 33,4; 26,0; 21,8; 23,9; 24,6;	22,8	3,8	36
TT	43,1; 44,2; 36; 42,7; 38,0; 44,9; 43,4; 53,3; 52,8; 45,5; 51,4; 53,3; 44,3; 51,8; 43,4; 45,2; 42,3; 53,1	46,0	36	53,3
DCI	8; 3,9; 7,1; 6,9; 5,3; -1,1; -1,2; 11,5; 10,1; 11,1; 14,5; 13,8; 21,7; 22,2; 18,6; 9,3; 10,4; 0,9	9,6	-1,2	22,2



Примеры вертикальных профилей $\Gamma(z)$ и $\chi(z)$. Красными овалами отмечены области глубокой конвекции. *a* – профиль за 2.07.2007 15-58 (GMT); *б* – профиль за 26.08.2007 2-21(GMT)

Как видно из рисунка, вертикальные профили распределения параметра статической устойчивости атмосферы Γ и индекса Фальковича соответствуют областям с глубокой конвекцией на уровнях 2–3,5 км для 02.07 и 2,5–3 км для 26.08.

Обсуждение результатов этого раздела приведён в следующем разделе.

3.3. Анализ полученных распределений конвективных индексов

Для извлечения информации радиозатменного зондирования из исходных файлов COSMIC/FORMOSAT был выбран следующий пространственный диапазон. Предельная высота 15 км была выбрана для данного исследования как максимальный уровень возможного развития конвекции на широте Санкт-Петербурга. Шаг данных эксперимента COSMIC/FORMOSAT по вертикали составляет 100 м. По широте и долготе из исходного набора файлов для каждого дня извлекались только данные зондирований, попадающих в участок от 58 до 62 ° с.ш и от 28 до 32 ° в.д. В указанный широтно-долготный диапазон попадали от 1 до 4 радиозондирований для каждого дня, сопровождавшегося явлениями глубокой конвекции. В нескольких случаях, когда зондирований в окрестностях Санкт-Петербурга не наблюдалось, исследовались характеристики состояния атмосферы для ближайших дней, но всегда в заданном квадрате. Исходные данные эксперимента COSMIC/FORMOSAT содержат высотные распределения значений температуры воздуха в °С, парциального давления водяного пара и атмосферного давления в гектопаскалях, значения индексов рефракции в *N*-единицах, широты и долготы измерений через каждые 100 м.

Расчеты параметров состояния атмосферы для выбранных дней за 2007 г., сопровождавшихся явлениями глубокой конвекции, проводились по формулам с (1.1) по (1.10).

Как отмечалось, данные радиозатменного зондирования не всегда содержат информацию о вертикальном распределении метеорологических параметров в нижнем слое тропосферы, наиболее важном для диагностики развития конвекции. Например, при наличии 60 случаев для летнего периода 2007 г. (дни с грозами или соседние сроки) лишь 20 из них могут быть полностью проанализированы с помощью радиозатменных характеристик, начиная от уровня 0,2–0,5 км. Поэтому рассчитать индексы, зависящие от метеорологических параметров на уровне 850, 700 гПа, например, LI, DCI, Total Totals или K index для 2007 г. было возможно лишь для 18 случаев. В качестве наблюдений использовалась информация, полученная с помощью грозопеленгатора TSS928 и записи работников АМЦ Пулково, в которых время начала и окончания гроз указано не всегда. Как правило, в дни с грозами, когда имеются данные зондирования нижней тропосферы значения LI составляют от 0,4 до 2,3 (для определения порогового критерия, см. табл. 4), параметры Total Totals и K index характеризуются величинами от 37 до 52 и от 11,0 до 28,2 соответственно, а DCI имеет величину от 4,1 до 18.

Выделяется высокими значениями параметров конвекции среди этих случаев 7 июля и 22 августа. Что говорит о том, что произведенное радиозатменное зондирование, точно попало в область конвекции как по временным, так и по пространственным координатам. Величина LI равна -0,1 и 0 для двух рассмотренных дней, что говорит о сравнительно небольшой неустойчивости атмосферы. Согласно табл. 4 и 5, величины K index и Total Totals указывают на возможность изолированных гроз: 30,8 и, 33,4, 51,4 и 51,8, что соответствует действительности.

Например, ясно, что параметру DCI предложенный порог, равный 30, не подходит для использования в Санкт-Петербурге. Этот индекс принимает значения не более 22,2 для всех случаев с явлениями глубокой конвекции в течение лета 2007 г. Так, 7 июля и 22 августа он имеет значения 14,5 и 22,2, соответственно.

Заключение

С помощью индексов конвекции и на основе данных эксперимента COSMIC/FORMOSAT по радиозатменному зондированию была проведена диагностика явлений глубокой конвекции для Санкт-Петербурга. Основным вопросом исследования являлся следующий: насколько точно данные по радиозатменным наблюдениям позволяют анализировать конвективные процессы, а значит, будет ли полезным их усвоение в прогностических моделях. Был проанализирован следующий набор параметров состояния атмосферы для Санкт-Петербурга: индекс статической устойчивости атмосферы Γ , LI, TT, K index, параметр Фальковича χ , DCI. Данные параметры были выбраны, как применимые к исследованиям грозовых явлений, удобные для расчетов по доступным метеорологическим величинам радиозатменного зондирования COSMIC/FORMOSAT, отлично зарекомендовавшие себя в мировой синоптической практике (LI, TT, K index) или используемые лишь в России (индекс статической устойчивости атмосферы Γ , параметр Фальковича χ) и относительно новые конвективные характеристики состояния атмосферы (DCI).

Выбор максимального верхнего уровня извлекаемых данных объясняется тем, что даже явления глубокой конвекции на северо-западе России не развиваются на большой высоте.

Подготовленные данные радиокультационного зондирования и наблюдаемых гроз в Санкт-Петербурге и близлежащих пунктах применимы для выполнения студенческих дипломных проектов и дальнейших исследований в области применения данных эксперимента COSMIC/FORMOSAT.

Следующим шагом данной работы может являться проведение более масштабных расчетов индексов для близлежащих к Санкт-Петербургу пунктов и создание статистически значимых пороговых критериев для выбранных параметров конвекции с четкой географической привязкой, последующей разработкой рекомендаций и обоснования возможного внедрения результатов исследований в оперативную практику прогноза явлений глубокой конвекции.

Научная новизна результатов проекта заключается в освоении новейших данных эксперимента COSMIC/FORMOSAT, создании программного комплекса для работы с полученными данными по диагностике явлений глубокой конвекции над Санкт-Петербургом и прилегающей территорией за летний период 2007 г., выявлении характеристик явлений глубокой конвекции над Санкт-Петербургом по точным радиозатменным наблюдениям. Целесообразность использования данных эксперимента COSMIC/FORMOSAT по радиозатменному зондированию неоспоримо может служить причиной для обращения к данным в формате weather (реальное время) для внедрения в прогнозы явлений глубо-

кой конвекции на северо-западе России, в частности для Санкт-Петербурга и территорий, прилегающих к Санкт-Петербургу.

Литература

1. Громаков Ю.А. Технологии определения местоположения в GSM и UMTS [Текст] / Громаков Ю.А., Северин А.В., Шевцов В.А. – М.: Эко-Тредз, 2005. – 144 с.
2. Информационно-аналитический центр ЦНИИмаш [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>
3. Проект GPS/MET [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cosmic.ucar.edu/gpsmet/>
4. Проект CHAMP [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/>
5. Проект COSMIC [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cosmic.ucar.edu/>
6. Проект EQUARS [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.laser.inpe.br/equars/eng/SiteEquars.shtml>
7. Проект МЕТОР GRAS [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/EUMETSAT_Polar_System/Space_Segment/SP_1139327243878?|=en
8. Русин И.Н. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды [Текст] / И.Н. Русин, Г.Г. Тараканов. – СПб.: РГГМИ, 1996, с. 308.
9. Фалькович, А.И. Динамика и энергетика внутритропической зоны конвергенции [Текст] / А.И. Фалькович. – Л.: Гидрометеиздат, 1979, с. 246.
10. Anthes, R.A. Applications of COSMIC to Meteorology and Climate [Text]/ R.A. Anthes, C. Rocken, Y.-H. Kuo // TAO, 2000, Vol. 11, No. 1, p. 115–156. Calas, C. Mesoscale analyses and diagnostic parameters for deep convection nowcasting. [Text]/ C. Calas, V. Ducrocq, S. S en esi // Meteorol. Appl., 2000, 7, p. 145–161.
11. Anthes, R. A. The COSMIC / FORMOSAT-3 Mission. Early results [Text]/ R. A. Anthes et al. // Bull. American Meteorological Society, 2008, Vol. 89, p. 313–333.
12. Cheng, F. Satellite Constellation Monitors Global and Space Weather [Text]/ F. Cheng et. al. // EOS, 2006, Vol. 87, No.17–25, p. 166–167.
13. Cornelius, A. Project DUC [Электронный ресурс] / A. Cornelius // <http://www.downunderchase.com/duc/-Weatherwatch.2008>. – Режим доступа: <http://www.downunderchase.com/storminfo/stormguide/guide03.html>
14. Project NOAA [Электронный ресурс]/ US Dept of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, 2008. – Режим доступа: <http://www.weather.gov/glossary/index.php?letter=k>
15. Project NOAA JetStream [Электронный ресурс]/ National Oceanic and Atmospheric Administration, JetStream.–Online School for Weather, 2008. – Режим доступа: http://www.srh.noaa.gov/jetstream/append/glossary_k.htm
16. Project JEFF HABY [Электронный ресурс] – METEOROLOGIST JEFF HABY, 2008. – Режим доступа: <http://www.theweatherprediction.com/severe/ingredients>
17. Rocken C., Kuo Y.-H., Sokolovskiy S., Anthes R.A. The ROCSAT-3/COSMIC Mission and Applications of GPS Radio Occultation Data to Weather and Climate // in Remote Sensing Applications of the Global Positioning System / Edited by Michael Bevis, Yoshinori Shoji, Steven Businger. – Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5661 (SPIE Bellingham, WA), p. 1-12.
18. S en esi, S. MSG and the nowcasting of convective systems: Relevance of instability indices and other convection-related diagnostics. Nowcasting and Very Short Range Forecasting [Text] / S. S en esi, V. Ducrocq, R.-M. Rose-May Thepenier, C. Calas// SAF Training Workshop. 9–11 December 1998.
19. Sokolovskiy, S. Inversion of SAC-C Open-Loop Radio Occultation Signals at UCAR [Text] / S. Sokolovskiy, C. Rocken, D. Hunt, W. Schreiner, J. Johnson, D. Masters, S. Esterhuizen // American Geophysical Union, Fall Meeting 2005, abstract #A51F-03.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0742).