

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА В ДНИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев

Рассмотрены случаи экстремального загрязнения приземного слоя атмосферы г. Челябинска с использованием мезомасштабной модели WRF. Произведена оценка пространственно-временных характеристик городского острова тепла, рассматривается зависимость его интенсивности от времени суток и фоновых атмосферных условий.

Ключевые слова: неблагоприятные метеоусловия, приземный слой атмосферы города, мезомасштабная модель WRF.

1. Введение. Исследования характеристик приземного слоя атмосферы над крупным городом на примере Челябинска, начатые авторами несколько лет назад [1], показали, что, как и над другими мегаполисами, над Челябинском формируется характерная структура, которая называется городской остров тепла (ГОТ). Особенно ярко он проявляется в дни с антициклональным типом погоды, когда горизонтальный перенос и вертикальное турбулентное перемешивание ослаблены, и над городом сохраняется повышенный температурный режим по сравнению с пригородами. Помимо этого в таких же условиях в городской атмосфере формируется высокий уровень загрязнения. Продолжая предыдущие исследования с использованием мезомасштабной модели WRF, мы ставим в задачи данной работы определение параметров приземного слоя атмосферы, характерных для дней с экстремальным уровнем загрязнения. Предполагается, что интенсивность ГОТ в такие дни наивысшая, а его пространственные границы наиболее четко выражены. В данной статье рассматриваются пять случаев с экстремальным уровнем загрязнения (СЭЗ), определенных в соответствии с методикой, изложенной в [2].

2. Конфигурация модели и исходные данные. Численное моделирование осуществлялось на базе мезомасштабной модели WRF, установленной в Лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ. Ос-

новые характеристики и возможности модели подробно изложены в наших предыдущих работах, например [1]. Конфигурация модели, необходимая для исследования приземного слоя в периоды СЭЗ, была обоснована в нашей предыдущей статье [3].

Модели городского острова тепла построены для пяти случаев с экстремальным уровнем загрязнения в холодный период 2009 года, отбор этих случаев также обоснован в нашей предыдущей работе [3]. На качество результатов моделирования влияет пространственное разрешение географических данных и учет особенностей строения подстилающей поверхности города. Для моделирования атмосферных процессов в холодный период года были выбраны следующие схемы параметризации: для микрофизических процессов – WRF single-moment 3-class scheme, включает взаимные превращения жидкой воды, снега и льда в атмосфере и эффективно работает в мезомасштабных сетках; для потоков длинноволновой радиации – RRTM; для потоков коротковолновой радиации – схема Dudhia; параметризация пограничного слоя – параметризация Mellor–Yamada–Janjic, параметризация турбулентности в пограничном слое в свободной атмосфере; приземный слой – параметризация. Эта модель основывается на уравнениях теории подобия Молина–Обухова, масштабе термической неоднородности Зелинткевича и стандартными функциями подобия; для параметризации процессов в почве и на поверхности – схема Noah. Для задания параметров подстилающей поверхности в городской застройке использована параметризация BEP (Building Environment Parameterization) – многослойная модель, учитывающая вклад в потоки энергии зданий различной высотности.

В качестве начальных и граничных условий для моделирования атмосферных параметров использовались метеоданные анализа NCEP с пространственным разрешением 0,5 град. по широте и долготе.

Валидация результатов моделирования требует сравнения модельных и измеренных метеорологических величин в различных точках исследуемой территории. На территории г. Челябинска и его окрестностей регулярные метеорологические измерения производятся всего на двух метеостанциях: в п. Шершни каждые 6 часов и в аэропорту на метеостанции (АМСГ) Баландино, где приземные параметры измеряют каждый час для регулярной сводки погоды в коде METAR. На стационарных постах экологического мониторинга Челябинска некоторые приземные метеопараметры измеряются во время отбора проб воздуха в 7, 13 и 19 ч местного времени, кроме выходных дней. Таким образом, для валидации результатов моделирования в нашей работе использованы данные измерений приземной температуры (2 м) и скорости ветра на уровне флюгера (10 м) на метеостанции Шершни, АМСГ Баландино, на постах мониторинга № 22 (Металлургический р-н) и № 28 (Центральный р-н, Челябинский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды).

Область моделирования ограничена по широте $54^{\circ} \div 56^{\circ}$ с.ш. и по долготе $60 \div 63^{\circ}$ в.д. (домен 1), и включает г. Челябинск и окружающие его территории (домен 2) (рис. 1). Разрешение модели по горизонтали со-

ставляет 6000 м для внешнего домена (d1) и 1200 м для внутреннего (d2). Пространственно-временные характеристики всех вариантов расчета представлены в табл. По вертикали было задано 34 σ -уровня, 7 из которых находятся в нижнем приземном слое 1 км.

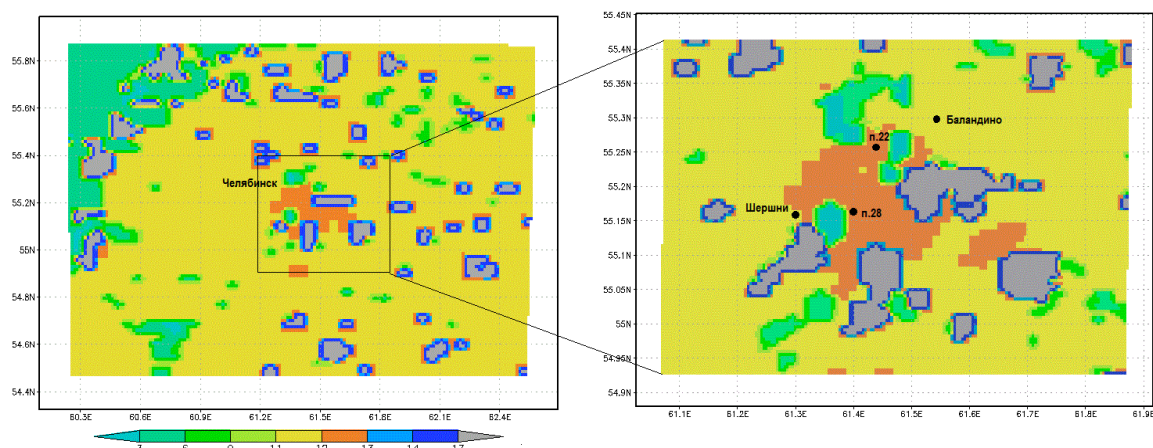


Рис. 1. Фрагмент области моделирования, содержащий территорию города, с указанием типов землепользования. Обозначения соответствуют принятым в модели WRF категориям: 13 – городская застройка; 12 – пашня, 6–7 – залежи, покрытые кустарником и т.п., 10–11 местности, занятые луговой растительностью, заболоченные земли; 1–2, 3–4, 5 – хвойный, лиственный и смешанный лес, 17 – водные объекты

Таблица

Характеристики случаев СЭЗ и результаты моделирования

1	Даты моделирования	28.01.09	11–12.02.09	18.02.09	21.02.09	25.02.09
2	период моделирования	28.01 00:00 – 29.01 05:00 30 ч	11.02 00:00 – 13.02 05:00 54 ч	18.02 00:00 – 19.02 05:00 30 ч	21.02 00:00 – 22.02 05:00 30 ч	24.02 05:00 – 26.02 23:00 66 ч
3	синоптика	МГП*	МГП, прямолинейные изобары	гребень	антициклон	гребень
4	сумма баллов СЭЗ [2]	16	23+14=37	14	16	12
5	пространственное разрешение (d1, d2)	6000, 1200	6000, 1200	6000, 1200	6000, 1200	6000, 2000
6	WRF vs. Баланд. коэфф. корр. $t_2 / ws10$	0,9 / 0,9	0,9 / 0,6	0,3 / 0,4	0,9 / 0,7	0,5 / 0,6
среднее за период изм. – WRF на пунктах наблюдения t_2 , °C / $ws10$, м/с (в скобках указано среднее модулей разности)						
7	п. 28(МГП)	3,4 / -2,3	2,5 / -2,7	2,3 (3,5) / -4,3	нет изм.	3,8 / -1,8
8	п. Шершни	-1,9 / -1	4,6 (4,9) / -0,7 (1,2)	3,0 (3,3) / -2,6	3,7 / -0,1 (0,8)	5,4 / -0,7 (1,4)
9	п. 22	3,0 / -1,6	5,1 / -1,8	2,9 (3,2) / -3	4,1 / -1,6	6,6 / -1,7 (2,1)
10	п. Баландино	-4,4 / 0,2	1,3 (3,1) / 0,3 (1,7)	-2,1 (4,3) / -1,7	2,4 / 0 (0,6)	3,8 (3,8) / -0,7 (1,2)
средняя приповерхностная температура за период по модели, °C						
11	Шершни	-11	-11,2	-12,1	-18,2	-14,5

* – малоградиентное поле повышенного давления.

3. Результаты и анализ. Результаты моделирования имеют временной шаг 1 час. Измерения на постах мониторинга производятся 3 раза в сутки в 7, 13 и 19 ч местного времени. В эти же часы взяты данные моделирования и составлены абсолютные разности между измеренными и рассчитанными метеопараметрами. Для метеостанции Шершни имеются данные измерений уже 4 раза в сутки, а на метеостанции Баландино данные измерений поступают раз в час.

Для оценки близости результатов вычисления метеорологических величин с помощью модели WRF и измерений на метеостанциях и постах были рассчитаны разности между прогнозируемыми приземной температурой и скоростью ветра и результатами наблюдений (табл. 1). В строках 6–10 курсивом выделены значения, относящиеся к скорости ветра. В скобках указаны средние значения абсолютной разности измеренных и рассчитанных величин, поскольку в некоторые сроки измерений величина по модели меньше рассчитанной, т.е. разность по измерениям и модели отрицательна.

В целом модель хорошо описывает основные тенденции изменения температуры и скорости ветра в течение указанного периода наблюдений. Однако воспроизводятся не все особенности их временного хода.

Для *валидации модели* были рассмотрены следующие характеристики:

1. Коэффициенты корреляции между измерениями температуры и ветра на метеостанции Баландино демонстрируют значимую связь между измерениями и расчетами. Для температуры воздуха корреляция для всех случаев выше, чем для скорости ветра. Коэффициенты имеют достаточно высокое значение (табл., строка 6), за исключением 18 февраля, что может быть связано с какими-то неучтенными для данного конкретного случая особенностями конфигурации модели.

2. Среднее за период моделирования значение разности приземной температуры воздуха и скорости ветра, измеренных на пунктах наблюдения и рассчитанных с помощью модели. В ряде случаев измеренные величины превышают смоделированные, в ряде случаев – наоборот, поэтому отдельно определялись средние значения модуля разности значений, которые указаны в табл., строки 7–10 в скобках. Средние значения разностей температуры в большинстве случаев положительны, а скорости ветра – отрицательны. Это означает, что при данной конфигурации модель занижает температуры приповерхностного слоя воздуха внутри города и завышает скорости ветра, рассчитанные на уровне флюгера. Из таблицы видно, что в пунктах измерения, расположенных в пригороде (Шершни, Баландино), встречаются случаи, когда модель завышает измеренные температуру и занижает скорость ветра.

Разность измеренной и рассчитанной температурой по пунктам города варьирует от -4,4 до 6,6 °С при среднем значении 3,1 °С, а скорости ветра от -4,3 до 2,1 м/с при среднем -0,8 м/с.

Для изучения острова тепла г. Челябинска в холодный период года были рассмотрены следующие характеристики.

1. *Интенсивность острова тепла*, т.е. разность температур в черте города и его пригородах. В качестве репрезентативной точки был выбран п. 22, расположенный в центре промышленного Metallургического района. Температура приповерхностного слоя воздуха, измеренная и рассчитанная в этой точке, сравнивалась с температурами в других точках, расположенных как в черте города, так и в его наветренной и подветренной части (в соответствии с розой господствующих ветров). Результаты нагляднее всего представить на графике, используемом в данной статье. На рис. 2 показан временной ход интенсивности ГОТ как разности температур между п. 22 и точками, где расположены метеостанция Шершни, п. 28 (Челябинский гидрометцентр, обозначенный на рисунке как МТП) и п. Баландино (аэропорт). Вертикальными линиями указана интенсивность ГОТ по данным измерений в тех же точках.

На рис. 2 сведены все случаи моделирования ГОТ холодного периода. Максимальной интенсивности ГОТ достигал в периоды с минимальными скоростями ветра, отсутствием вертикального и горизонтального перемешивания воздуха и составил $6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 12 февраля в 01:00 и $7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 18 февраля в 08:00 местного времени. В первую очередь отметим, что как по данным измерений, так и по данными моделирования, хорошо выделяется суточный ход ГОТ. Он достигает максимальных значений, как правило, во второй половине дня, в вечерние часы и ослабевает в середине ночи. Очевидно, в холодный период года это связано в первую очередь не с притоком солнечной радиации, а с усилением хозяйственной деятельности и транспортной активности в течение рабочего дня и вечера, т.е с антропогенными источниками тепла. Напомним, что в статье рассматриваются дни и периоды с экстремальным загрязнением воздуха, когда максимум загрязнения приходится на последнюю часть застойного периода в приземном слое воздуха. Поэтому в конце каждого периода, как видно на рис. 2, как правило, ГОТ ослабевает в связи с изменением синоптической ситуации, усилением ветра и т.п.

Если сравнивать интенсивность ГОТ по наблюдениям и модели, то можно увидеть, как отмечалось выше, что модель склонна занижать приземную температуру воздуха, и по измерениям интенсивность ГОТ выше, чем по модели. При этом и по измерениям, и по модели интенсивность ГОТ имеет положительный знак в сравнении с метеостанцией Шершни, расположенной в наветренной части города, в нескольких километрах к юго-западу от Metallургического района. В то же время сравнение с метеостанцией Баландино, которая находится ближе к п. 22 и с «подветренной» стороны города, дает отрицательные величины, т.е. модель «смещает» остров тепла на северо-восток, в сторону Баландино, что хорошо видно на рис. 3.

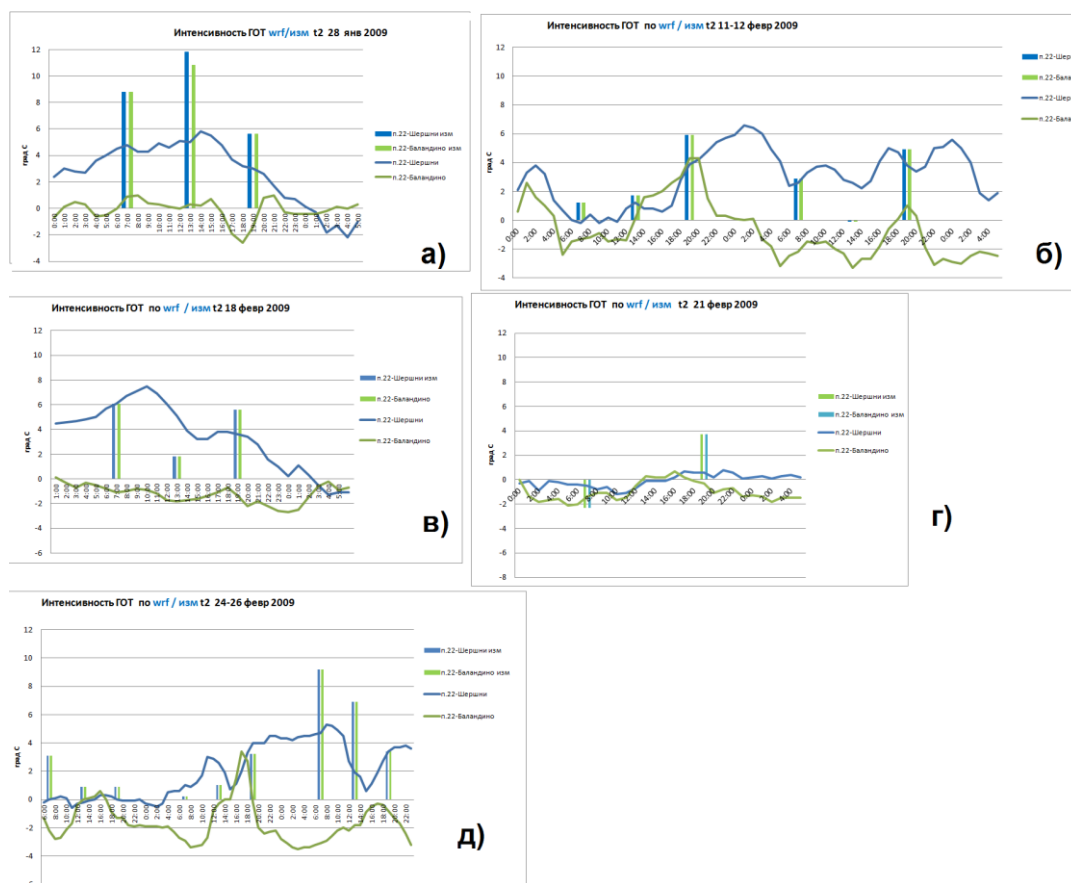


Рис. 2. Временной ход интенсивности острова тепла по расчетам для п. 22 и Шершни (синий) и Баландино (зеленый). Столбцы – по данным измерений. Даты моделирования а) 28.01.2009; б) 11–12.02.2009; в) 18.02.2009; г) 21.02.2009; д) 25.02.2009

Абсолютные значения величины ГОТ отличаются от одного случая к другому. Например, для более низких фоновых температур воздуха, интенсивность ГОТ небольшая, не превышает $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ по измерениям и $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ по модели (21 февраля).

2) *Пространственная конфигурация ГОТ.* На рис. 3 приведен пример пространственного распределения области повышенных приземных температур, связанных с г. Челябинском т.н. температурная аномалия. На рис. 3 визуализирована разность температуры в каждой точке области моделирования и среднего значения по этой области. Таким образом, можно увидеть, как меняется положение и интенсивность острова тепла во времени и в зависимости от направления воздушных потоков. Например, в течение периода моделирования с 24 февраля 05:00 до 26 февраля 23:00 происходило изменение направления приземного ветра с северо-западного на западный и юго-западный, почти южный. Как видно на рис. 3а, 25 февраля в 10:00 местного времени остров тепла имеет конфигурацию, вытянутую с запада на восток, а уже через сутки (рис. 3б), 26 февраля в 08:00 изотермы вытянуты с юго-запада на северо-восток. Наибольший градиент температур находится на наветренной части ГОТ.

На рис. 3а, б показаны изолинии рельефа – изогипсы – которые указывают, на каких отметках высот расположен город и окружающие его водоемы, долина реки Миасс. Наибольшие контрасты температур связаны с центром, а также северной и юго-восточной частями города, где расположены основные промышленные предприятия.

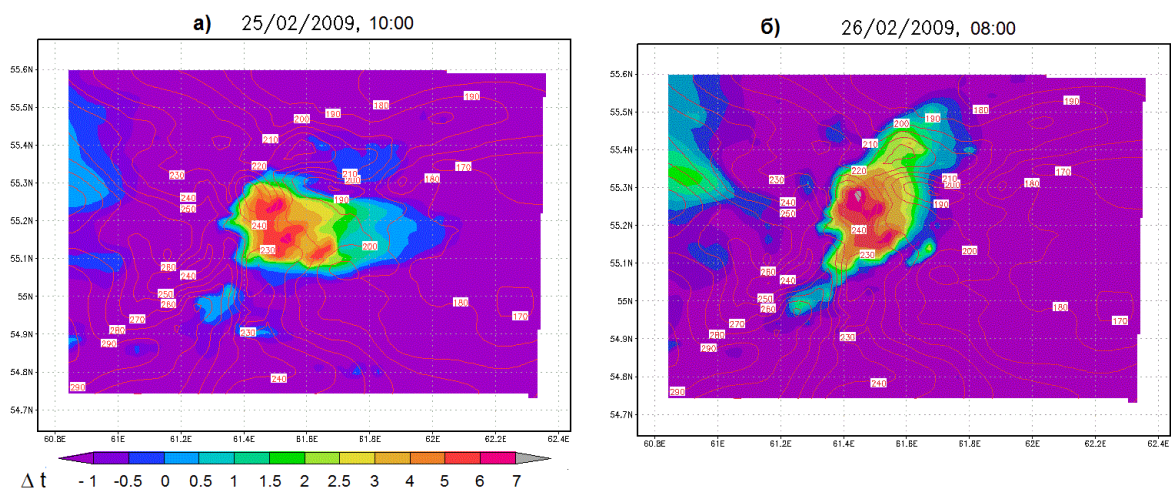


Рис. 3. Горизонтальная протяженность острова тепла г. Челябинска в различные периоды экстремального загрязнения. Конфигурация ГОТ меняется в зависимости от направления приземного ветра. Цветом выделены различная интенсивность ГОТ Δt , °C. Указаны изолинии рельефа в метрах над у.м.

Вместе с тем в модели подстилающей поверхности Noah LSM [4], которая используется для моделирования острова тепла среди различных типов поверхности, есть и тип «поверхность города», для которой используются единые значения шероховатости, альбедо, доля растительности и др. для всех городов, без учета географических особенностей. Однако только учета типа подстилающей поверхности недостаточно. Для этого мы дополнительно используем параметризацию приземного погранслоя ВЕР. Взаимодействие с моделью Noah LSM (а значит, WRF) происходит через процент городского покрытия ячейки сетки моделирования. Раздельно учитываются потоки тепла от поверхностей разного типа (стены, крыши, дороги). Для параметризации ВЕР при включении в модель WRF по умолчанию используются морфометрические параметры застройки, *единые для всех городов*. Таким образом, на результаты нашего моделирования для Челябинска влияют такие индивидуальные характеристики территории, которые включены в модель, как рельеф местности, категории землепользования и пространственное разрешение геоданных. При этом был использован набор геоданных MODIS-21 с 21 категорией землепользования, где на городскую поверхность отводится только 1 категория. Максимальное разрешение этих данных –

30 угловых секунд, что для территории Челябинска соответствует 500 м в направлении запад–восток и 900 м юг–север.

Моделью WRF предусмотрено использование данных о поверхности города более высокого разрешения: высота зданий, их распределение по районам города, типы застройки в разных частях города, ширина и ориентация улиц и т.д. При использовании такого уточненного набора данных возможно построение индивидуальных особенностей острова тепла Челябинска. А пока что на его конфигурацию основной отпечаток накладывают рельеф местности, общая площадь городского покрытия и использование стандартизированных морфометрических параметров застройки для параметризации ВЕР.

Получение данных более высокого разрешения можно поставить как цель будущей работы.

4. Заключение. В результате исследования пяти случаев экстремально высокого загрязнения приземного слоя воздуха над Челябинском в холодный период года получены количественные характеристики городского острова тепла, такие как его интенсивность, которая может достигать 7 °С. Ввиду ограничений пространственного разрешения модели температура приземного слоя воздуха оказывается заниженной в результате расчетов, а скорость ветра – завышенной. Конфигурация и пространственная протяженность ГОТ определяется размерами города и рельефом местности, по крайней мере, пока в качестве геоданных используется набор MODIS-21, куда не включены детализированные базы данных высокого разрешения.

Библиографический список

1. Ленская, О.Ю. Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) / О.Ю. Ленская., С.М. Абдуллаев., А.И. Приказчиков, Д.Н. Соболев // Вестник ЮУрГУ. Серия 2Вычислительная математика и информатика. – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 65–82.

2. Абдуллаев, С.М. К вопросу объективного определения случаев экстремального загрязнения городской атмосферы (на примере Челябинска) / С.М. Абдуллаев, Е.А. Напольских, О.Ю. Ленская // Наука ЮУрГУ. Материалы 67-й научной конференции. Секция естественных наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – URL: <http://dspace.susu.ac.ru/xmlui/handle/0001.74/5355>.

3. Ленская, О.Ю. Предварительные результаты валидации модели атмосферного приземного слоя г. Челябинска в дни с экстремальным уровнем загрязнения / О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]. Материалы 68-й научной конференции. Секция естественных наук – Электрон. текст. дан. (7,66 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 168–175.

4. The Community Noah Land-Surface Model (LSM): User's Guide. – URL: ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/gcp/ldas/noahls/ver_2.7.1/.

[К содержанию](#)