

УДК 551.509.32

**С.В. Иванов, д.геогр.н., О.Р. Драничер, асп.**  
*Одесский государственный экологический университет*

## РОЛЬ АЛЬБЕДО В ФОРМИРОВАНИИ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА

*С помощью атмосферной мезомасштабной модели MM5 получена оценка влияния альбеда на термический режим над г.Одесса. Выполнено два краткосрочных численных эксперимента с различными значениями альбеда для урбанизированной территории. Результаты анализируются на основе суточного хода температуры воздуха для городской и сельской местности и её различий в двух экспериментах.*

**Ключевые слова:** альбеда, городской остров тепла, термический режим

**Введение.** Климат городов является социально и экономически значимым фактором. Доля населения, живущего в городах, особенно в странах с умеренным и суровым климатом постоянно увеличивается. Специфика городских климатических условий все больше отличаются от климатических условий окружающих города территорий за счет непрерывно усиливающегося влияния антропогенных факторов.

Ведущими специалистами в области городской климатологии признано существование аномалий метеоусловий в черте городов по сравнению с окружающей их неурбанизированной территорией [1]. Например, в городах северного полушария ежегодно наблюдается в среднем на 12% меньше солнечной радиации, на 8% больше облаков, на 14% больше осадков, на 10% больше снега и 15% больше гроз, чем в окружающей их сельской местности [1]. Концентрация загрязняющих веществ в городе может быть в 10 раз выше, чем в «чистой» атмосфере и температура воздуха может быть в среднем на 2 °С выше, а в мегаполисах разница между температурами в городе и его окрестностях может достигать 12 °С. Интенсивность острова тепла зависит от погодных условий и наиболее ярко он проявляется при ясном небе и слабом ветре [1].

Однако не до конца установлено соотношение механизмов, вызывающих эти аномалии. В числе причин происхождения «острова тепла» и других метеоклиматических аномалий выделяются несколько ведущих факторов: использование в городах большого количества энергоресурсов, уменьшение альбеда и увеличение при этом теплоемкости искусственных покрытий, уменьшение величины испарения за счет уменьшения проницаемости искусственных покрытий и отвода осадков канализационными сетями [1-2].

Размер острова тепла логарифмически связан с количеством населения в городе [1]. Острова тепла могут быть полезными или вредными для населения и потребителей энергии. В общем, острова тепла в низких и средних широтах являются нежелательными, поскольку они способствуют тепловым нагрузкам, дискомфорту и загрязнению воздуха. В высоких широтах они могут способствовать сокращению потребления энергии, необходимой для обогрева помещений [3].

Этим обусловлена научная актуальность и практическая необходимость изучения структуры городского острова тепла, его специфических особенностей и причин возникновения. Основная проблема связана с отсутствием адекватной наблюдательной сети измерения трехмерных полей температуры, влажности воздуха, скорости ветра и других величин в городских условиях. Компенсировать этот недостаток возможно с помощью численного моделирования городского острова тепла, которое позволяет

установить роль каждого из вышеперечисленных факторов на формирование температурного режима урбанизированной территории [3-4].

Альbedo поверхности является одной из физических характеристик, влияющих на температурный режим. Она определяется как полусферическая длинноволновая отражательная способность и в значительной мере зависит от неоднородности и орографии подстилающей поверхности. Альbedo урбанизированной территории изменяется в пределах 10-20%, но в некоторых городах значения могут быть больше [2]. Так, города в Северной Африке являются хорошим примером территорий с высоким альbedo (30-45%), в то время как большинство городов США и Европы имеют более низкое альbedo (15-20 %). Согласно [1], среднее значение альbedo города на 15% меньше альbedo сельской местности, за исключением лесов и пашен с темными почвами. Таким образом, чувствительность температуры воздуха к альbedo интересна со стороны исследования влияния городского острова тепла.

**Цель** данной работы состоит в исследовании формирования трехмерной структуры температуры воздуха над урбанизированными районами и анализе влияния альbedo на формирование острова тепла над городской территорией с помощью численного моделирования.

**Материалы и методы исследования.** Исследование проводилось с помощью негидростатической мезомасштабной модели MM5v3.7 [5]. При интегрировании модели использовано трехуровневое вложение сеток с двусторонним взаимодействием. Три модельные области были центрированы относительно точки с координатами 46,47°с.ш. и 30,75° в.д. Для материнской области D1 размером 131x101 узлов шаг сетки составлял 9 км, для вложенной области второго уровня D2 размером 121x97 узлов – 3 км, для дочерней области D3 размером 124x118 узлов – 1 км (рис.1). Расположение модельной области D3 было выбрано таким образом, чтобы детально воспроизвести состояние атмосферы над урбанизированной территорией г. Одесса и её сельскими окрестностями.

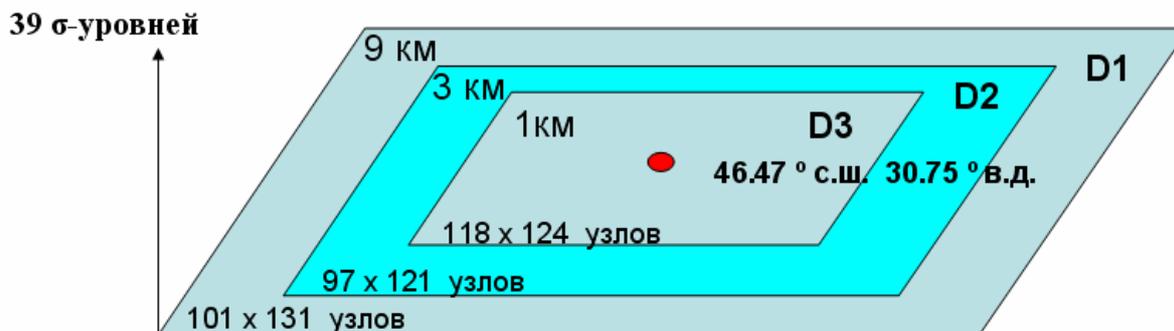


Рис. 1 – Конфигурация модельных областей с центром над г.Одесса.

Вертикальная координатная ось модельной атмосферы состояла из 39 неравномерно расположенных  $\sigma$ -уровней. Разрешение в нижнем километровом слое примерно равнялось 20 м и постепенно увеличивалось до 500 м к верхней границе, расположенной на уровне 10 гПа.

Численные эксперименты были выполнены для периода с 08 по 13 мая 2002г. Выбор дат основывался на критерии условия малоградиентного поля для минимизации синоптического влияния. Критериями такого выбора были ясное небо, низкая влажность, слабая скорость и неустойчивое направление ветра, высокое атмосферное давление и горизонтально-однородное поле приземной температуры воздуха (рис.2).

Первые 6 часов региональная модель адаптировалась к крупномасштабному начальному условию, и этот начальный отрезок времени отбрасывался, последующие часы прогноза использовались уже для анализа результатов.

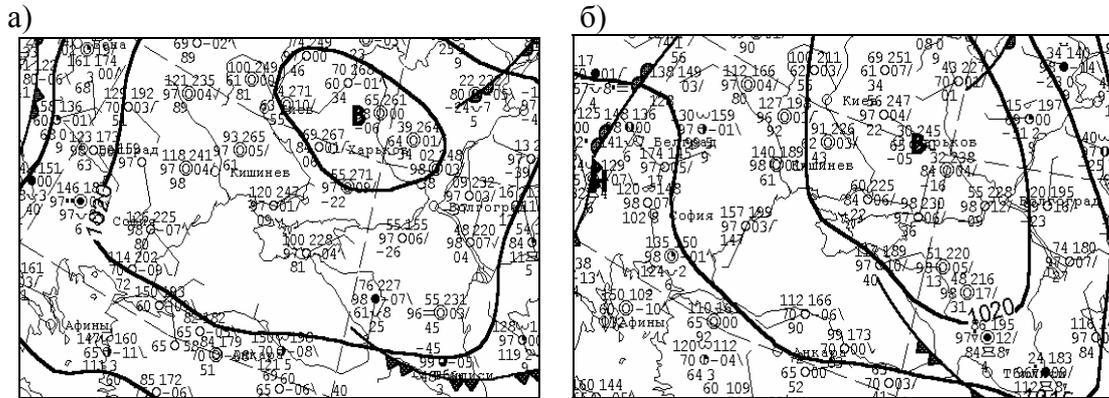


Рис. 2 – Карты приземного анализа за 00 UTC 09.05.2002г. (а) и 13.05.2002г. (б).

В модели MM5 предусмотрено несколько схем для каждого из типов параметризуемых процессов подсеточного масштаба [5], а именно, микрофизических процессов, кучевой облачности, потоков коротко- и длинноволновой радиации, и процессов в пограничном слое. Эти схемы различаются по сложности и количеству настраиваемых параметров. Выбор схемы определяется требованиями решаемых задач и в определенной мере субъективным фактором.

Для погранслоя в расчетах использовалась схема Блэкадара высокого разрешения с четырьмя режимами устойчивости [6]. В приземном слое вертикальные потоки рассчитываются на основе теории подобия Монина-Обухова, а в остальной части погранслоя применяется К-теория. Результаты расчетов по этой схеме зависят от способа задания коэффициентов турбулентного обмена. Для описания радиационных процессов использовалась схема RRTM [7]. Она построена на k-коррелированной модели и учитывает процесс абсорбции водяным паром, углекислым газом и озоном по всему спектральному диапазону. Температура в почве моделировалась на основе уравнения вертикальной диффузии тепла для пяти слоев [8]. Параметризация кучевой конвекции на областях D1 и D2 основывается на методе Грела [9]. На области D3 конвекция описывалась в явном виде.

Для задания начальных и граничных условий на периоде интегрирования модели использовались поля ре-анализа ERA40 с Гауссовой сеткой N80 для атмосферы от поверхности земли до уровня 10 гПа и поля подстилающей поверхности в сроки 00, 06, 12 и 18 UTC [10], конвертированные в формат модели MM5.

Для описания свойств подстилающей поверхности использовались данные Геологической службы США (USGS) с 24 категориями землепользования и разрешением 1'. На рис. 3 показаны типы подстилающей поверхности для области D3 с разрешением 1 км. Цифрами обозначены типы землепользования. Для выбранной области основные категории землепользования – это водная поверхность, поля и пастбища, луга и леса и небольшие участки урбанизированных территорий. Физические характеристики всех типов представлены в табл. 1. Урбанизированная область для Одессы обозначена квадратом (рис.3).

Расчеты проводились с временным шагом 6', а формирование полей вывода для  $\sigma$ -уровней происходило каждый час.

Выбор указанных внутренних параметров модели привел к тому, что расчет каждого отдельного эксперимента занимал порядка трех суток реального времени.

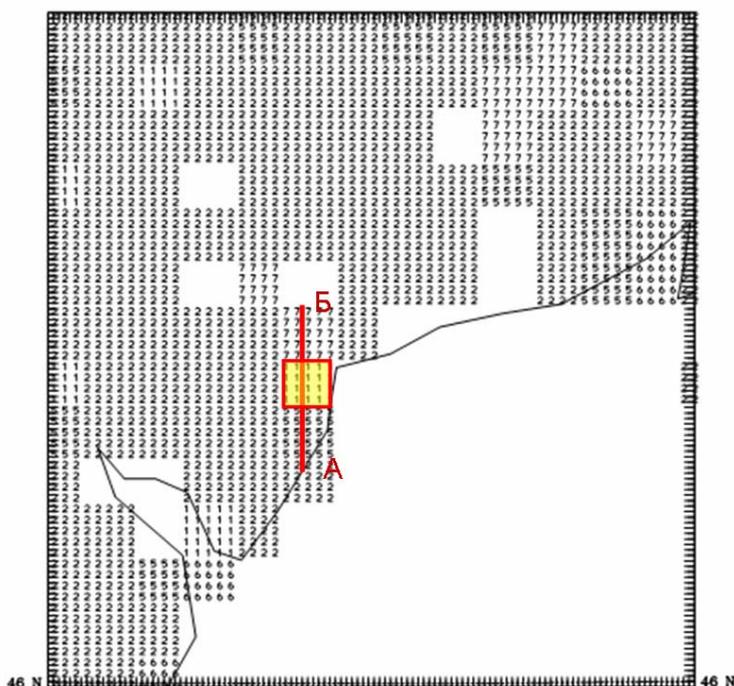


Рис. 3 – Типы землепользования для области D3 по классификации USGS. Линия АБ показывает разрез на рис. 7, 8.

Таблица 1- Характеристики типов землепользования для области D3

индекс	Тип подстилающей поверхности	Альбедро (%)	Доступное влагосодержание (%)	Излучательная способность	Шероховатость (см)	Термическая инерция $\text{Кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{с}^{-1/2}$
1	Город	15	10	88	50	0,03
2	Неорошаемые районы с/х культур, пастбища	17	30	92	15	0,04
5	С/х культуры и луга (мозаично)	18	25	92	14	0,04
6	С/х культуры и леса (мозаично)	16	35	93	20	0,04
7	Луга	19	15	92	0,12	0,03
	Вода	8	100	98	0,01	0,06

**Результаты исследования и их анализ.** Для анализа влияния альбедро на формирование острова тепла над городом проведено два численных эксперимента с высоким разрешением для выбранных дат. Эксперименты включали контрольную прогонку со стандартными значениями характеристик подстилающей поверхности  $\alpha=15\%$  (CTRL\_A15) и модифицированную прогонку со сниженным значением альбедро  $\alpha=10\%$  (URB\_A10).

По результатам моделирования проанализирован суточный ход температуры воздуха и направления ветра на всех уровнях до высоты 500 м. Особое внимание

уделялось ячейкам с урбанизированной подстилающей поверхностью. Для каждого срока по Гринвичу (далее UTC) построены поля пространственного распространения потенциальной температуры воздуха и ветра.

В ходе анализа полученных результатов были выявлены закономерности в суточном ходе температуры воздуха и поля ветра над городом и его окрестностями.

На рис.4а представлено распределение приземной температуры воздуха над Одессой за 16 UTC 8.05.2002г. на основании фактических данных. Более подробно об исследовании острова тепла над Одессой по данным измерений можно найти в [11]. На рис.4б представлено модельное поле температуры воздуха на нижнем  $\sigma$ -уровне (0,998), располагавшимся на высоте около 20 м. Согласованность пространственного распределения температуры воздуха в модели с фактическими данным подтверждает возможность реалистичного воспроизведения термического режима в нижней части пограничного слоя [12].

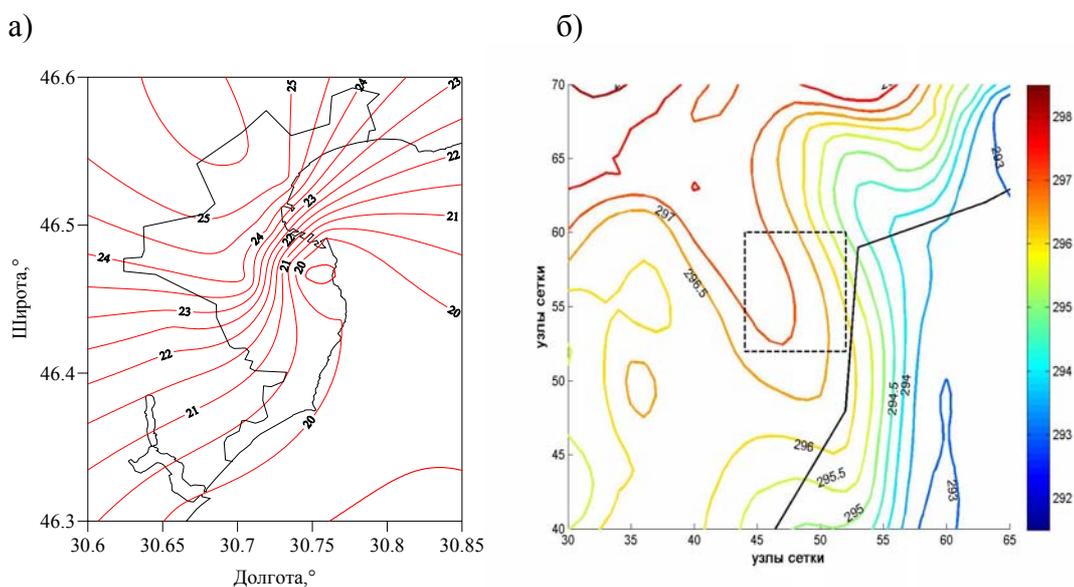


Рис. 4 – Пространственное распределение температуры воздуха над Одессой по фактическим данным (а) и по модели (б) за 16 UTC 08.05.2002г.

Одесса имеет ярко выраженную неоднородность рельефа и подстилающей поверхности (город расположен в прибрежной зоне на границе суша-море и находится в зоне развития бризовой циркуляции). Эти факторы оказывают влияние на формировании острова тепла в городе и на его пространственную структуру [1].

В поле температуры территория города прослеживается как нагретое пятно с максимумом, расположенным над его центром. На протяжении периода с 05-07 UTC до 09-14 UTC над территорией Одессы наблюдался ярко выраженный остров тепла (рис. 5а), который в отдельные часы (10.05 и 12.05 с 9-12 UTC) смещался по потоку на северо-запад, а впоследствии до 13-16 UTC прослеживался в виде гребня тепла над урбанизированной территорией (рис.5б).

С 18-20 UTC до 03-04 UTC над городом прослеживается отрицательный остров тепла – остров холода (рис.5в).

В поле ветра наблюдается бризовая циркуляция, которая характеризуется изменением направления ветра с восточного на западное (с суши на море) в 16-17 UTC и обратно (с моря на сушу) в 21-23 UTC 8, 12 и 13 мая 2002г. и 04-08 9-11 мая 2002г. Из-за ограниченности иллюстративных материалов в публикации рисунки с

изменением бризовой циркуляции не приводятся. При благоприятных условиях бризовая циркуляция распространяется до 30 км вглубь суши, т.е. захватывала всю территорию урбанизированного района.

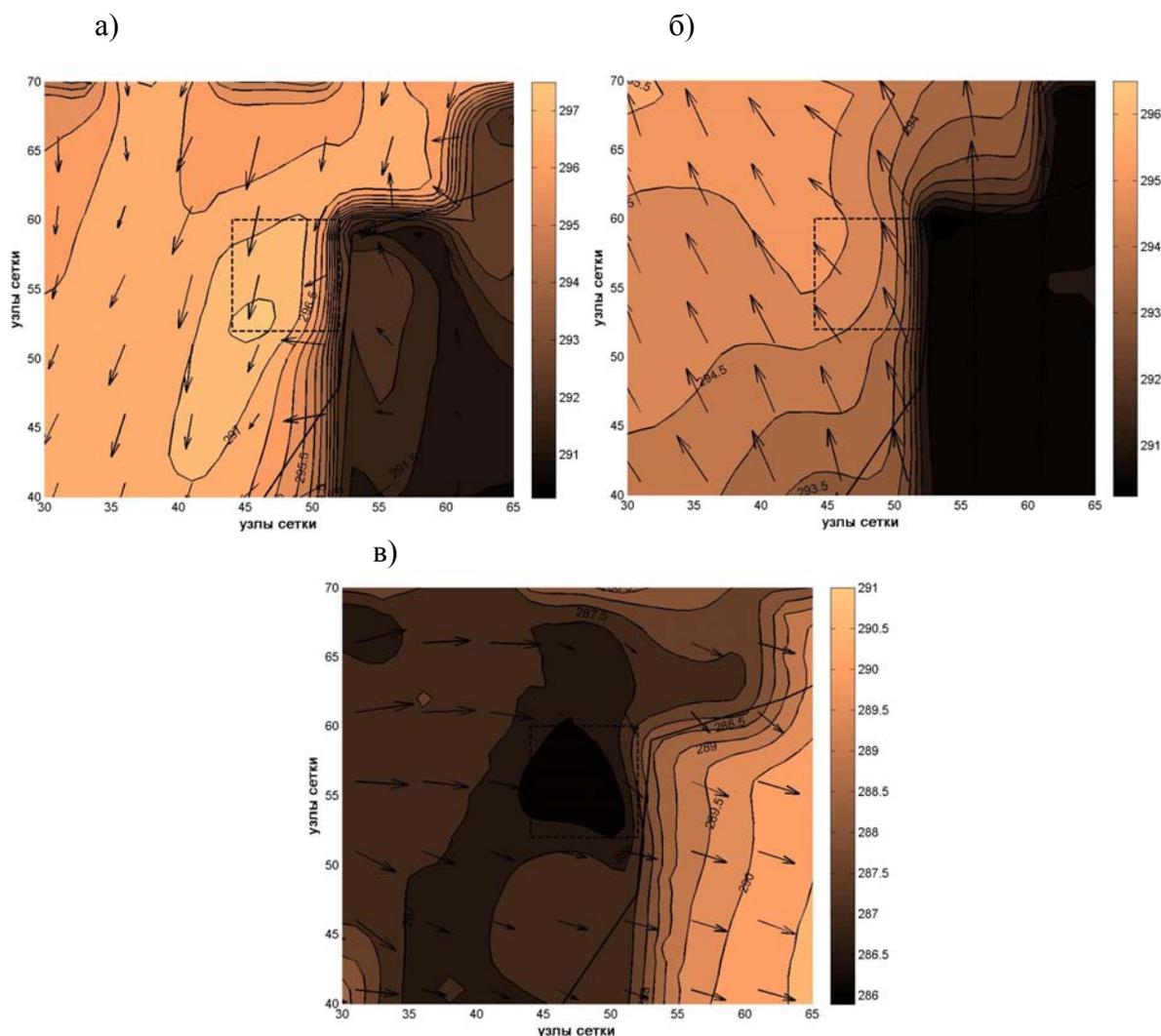


Рис. 5 – Пространственное распределение температуры воздуха и направления ветра на нижнем  $\sigma$ -уровне за 09 UTC 08.05.2002г. (а), за 13 UTC 10.05.2002г. (б) и за 02 UTC 11.05.2002г. (в) при CTRL\_A15.

В поле влажности город проявляет себя как "остров сухости". Влажность воздуха на нижнем  $\sigma$ -уровне (20м) в Одессе ниже, чем в окрестностях города практически на протяжении всего периода исследования (рис.6а). Это связано с повышением температуры и общим снижением содержания влаги в атмосфере над городом в результате уменьшения испарения с подстилающей поверхности.

Однако в период ночи и раннего утра, когда над территорией города происходит смена бризовой циркуляции с береговой на морскую, и до 06 UTC над Одессой наблюдается «остров влажности» (рис.6б).

Возмущения в полях температуры, формирующиеся под влиянием урбанизированной подстилающей поверхности, имеют трехмерную структуру. Поэтому для исследования трехмерной структуры острова тепла над городом было

построено вертикальный разрез АБ (с юга на север), как показано черной линией на рис. 3.

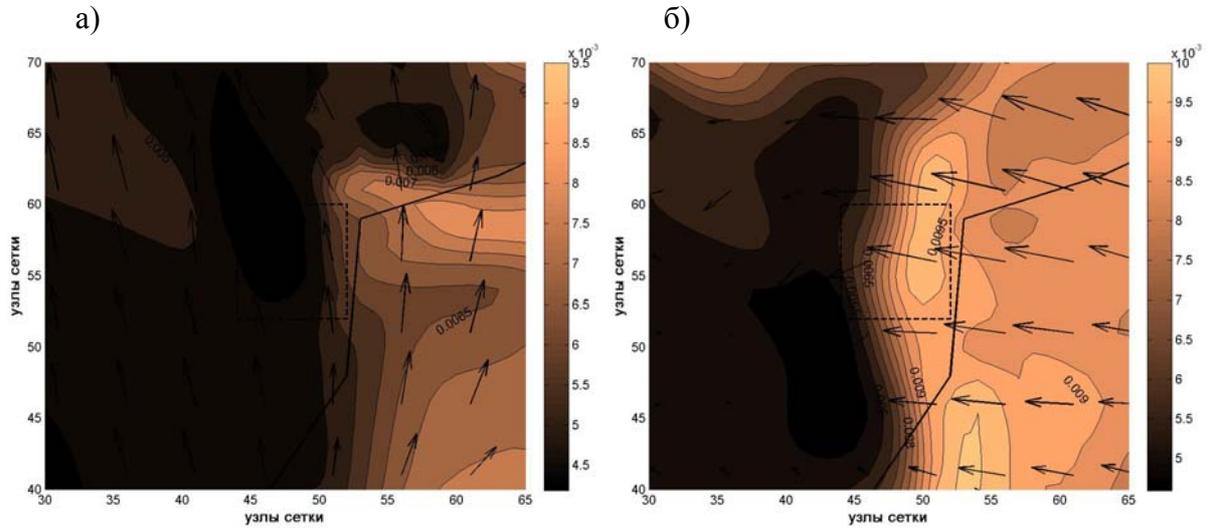


Рис. 6 – Пространственное распределение удельной влажности и направления ветра на нижнем  $\sigma$ -уровне за 16 UTC 12.05.2002г. (а) и за 00 UTC 13.05.2002г. (б) при CTRL\_A15.

В дневное время (с 05 до 15 UTC) над городом формируется остров тепла в виде купола (рис. 7а). При этом тепловое влияние города распространяется по вертикали до 500 метров. Это становится возможным благодаря тому, что вынужденная и свободная конвекция усиливаются на более теплой и шероховатой поверхности большого города.

В ночное время (с 18 до 02 UTC) над урбанизированной территорией на высотах прослеживается приподнятый очаг тепла, отделенный от поверхности земли теплый слой городского воздуха. Этот слой, простирающийся за пределы города, называют факелом города.

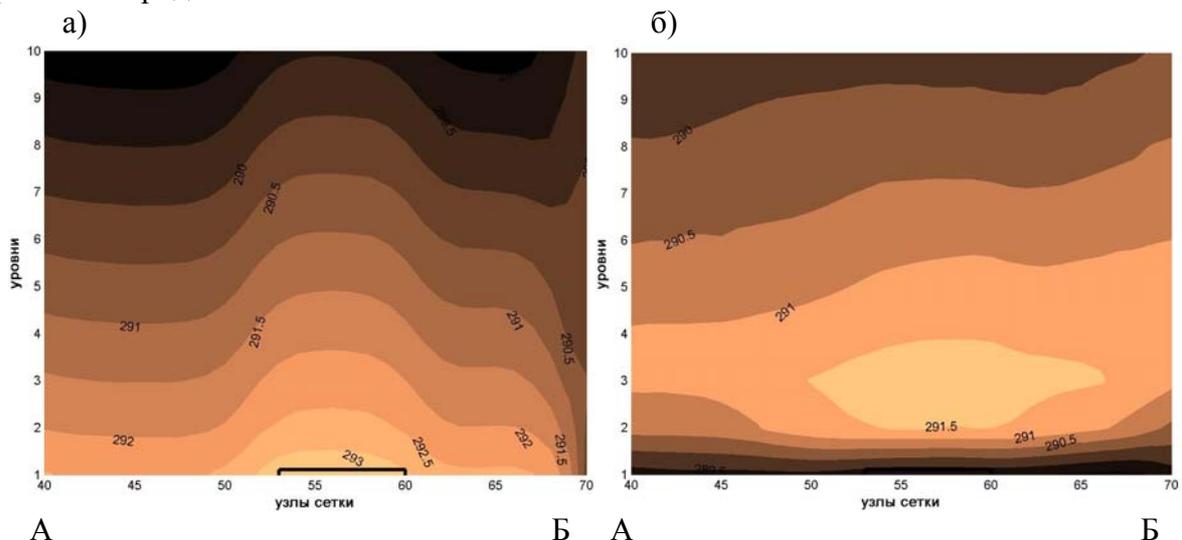


Рис. 7 – Вертикальный разрез АБ поля потенциальной температуры воздуха с юга на север за 07 UTC 10.05.2002г. (а) и за 21 UTC 09.05.2002г. (б) при CTRL\_A15. Линия сечения показана на рис.3.

Для установления роли альбедо в формировании поля температуры над городом рассматривается разница температур между двумя численными экспериментами с различным значением альбедо:

$$DIF = URB\_A10 - CTRL\_A15.$$

Для анализа значения  $Dif$  над городом были построены вертикальные разрезы АБ (с севера на юг) (рис.8).

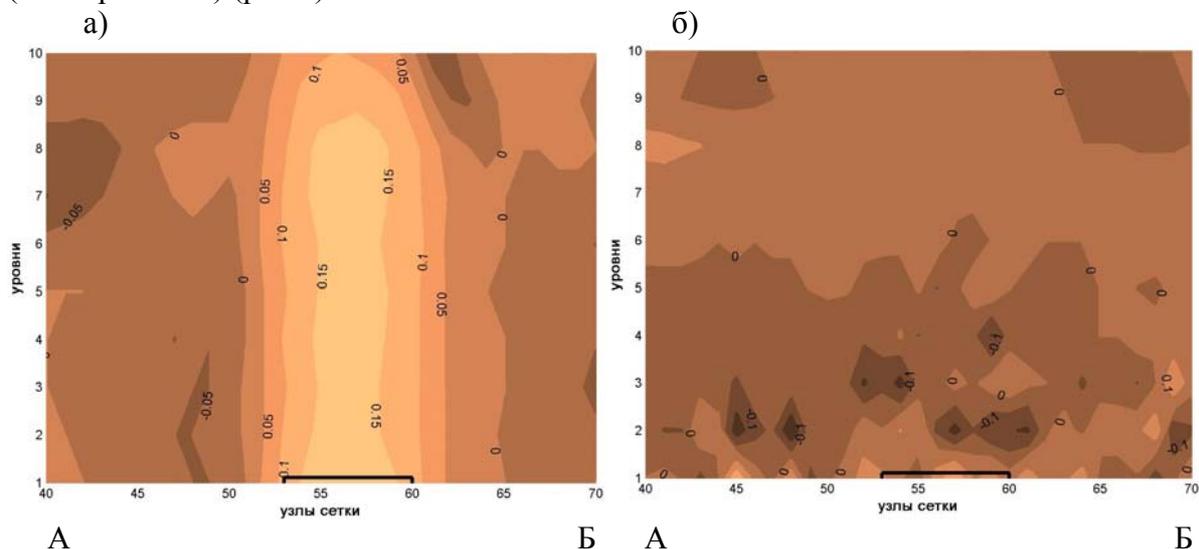


Рис. 8 – Вертикальный разрез АБ поля различий между модифицированным и контрольным численными экспериментами ( $Dif$ ) для потенциальной температуры воздуха с юга на север за 07 UTC 10.05.2002г. (а) и за 21 UTC 09.05.2002г. (б). Линия сечения показана на рис.3.

Анализ результатов контрольной и модифицированной (урбанизированной) прогонок показал различную степень изменения температурных полей над Одессой и её окрестностями. Снижение альбедо на 5% привело к повышению полей потенциальной температуры в дневное время (05-16 UTC) в среднем на 0,15 К. На рис.8а наблюдается явно выраженный остров тепла над городской территорией.

В ночное время, как видно из рис. 8б, таких однозначных результатов не наблюдается.

**Выводы.** Проведение численного моделирования для исследования пространственно неоднородности городского острова тепла над большим городом фактически обозначают следующий этап в исследовании особенностей городского климата. Если до этого в распоряжении исследователей городского острова тепла в разных странах были только экспериментальные данные о контрастах приземной температуры в городе и пригороде, и имелись лишь разрозненные ряды данных о ее вертикальном распределении, полученные в основном с помощью привязных аэростатов, радиозондов и вышек, то теперь численное моделирование дает возможность исследовать трехмерную картину термических процессов в пограничном слое атмосферы над городом. Это позволяет провести количественные оценки различных факторов, влияющих на формирование городского пограничного слоя, в том числе на возникновение и развитие городского острова тепла. С точки зрения практического использования численное моделирование в новом аспекте дает наибольшую возможность воспроизведения острова тепла над городом и его динамику.

В данной работе с помощью численного моделирования рассмотрен температурный режим города, окруженный не только сельской местностью, но и

акваторией моря. Но даже при такой сложной ситуации проявились особенности термического режима города.

Согласованность пространственного распределения температуры воздуха с фактическими данными подтверждает возможность реалистичного воспроизведения в модели термического режима в нижней части пограничного слоя.

В поле температуры воздуха территория города проявилась как остров тепла в дневное время (с 05-14 UTC) и как остров холода в ночное время (18-04 UTC). В дневные часы остров тепла под воздействием ветра смещается от урбанизированной территории на северо-запад от города.

В поле ветра над Одессой воспроизводится формирование бризовой циркуляции.

В поле влажности город проявляет себя как "остров сухости" практически весь день, кроме периода с поздней ночи и до 06 UTC, когда наблюдается "остров влажности".

Возмущения в полях температуры, сформированные под влиянием урбанизированной подстилающей поверхности, имеют трехмерную структуру. В дневное время тепловое влияние города может распространяться по вертикали до 500 метров. В ночное время над городом образуется приподнятый очаг тепла с простирающимся за пределы городской черты городским факелом.

Альбедо городской поверхности оказывает существенное влияние на радиационный баланс в пределах городской застройки, а особенно на температурный режим городов. Снижение альбедо на урбанизированной территории на 5% приводит к усилению городского острова тепла в дневное время в среднем на 0,15 К. Отсюда можно сделать вывод, что при городском планировании следует учитывать цвет стен и крыш зданий, так как увеличение альбедо города (например, окраска крыш в белый цвет) является эффективным способом ограничения эффекта «городского острова тепла», уменьшая потребности в охлаждении и тем самым существенно предотвратить энергопотери и, следовательно, экономические убытки [10]. В ночное время изменение альбедо не проявляется.

Приведенные результаты моделирования позволяют уточнить ряд представлений об особенностях и закономерностях формирования возмущений в термическом поле над городом. В целом же можно сказать, что свойства подстилающей поверхности над урбанизированными территориями оказывают значительное влияние на формирование термического режима города.

В перспективе предусматривается исследование трехмерной структуры поля ветра для анализа роли динамического фактора и тепловой инерции в формировании термического режима.

### Список литературы

1. Оке Т.Р. Климаты пограничного слоя: Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 360 с.
2. Taha H. Urban climates and heat island: albedo, evapotranspiration, and antropogenic heat // Energy and buildings. – 1997. – №26. – P.99-103.
3. Мягков М.С. Влияние мегаполиса Москва на величину испарения // Метеорология и гидрология. – 2005. – №3. – С. 78-80.
4. Mahura A., Petersen C., Baklanov A., Amstrup B., Korsholm U.S., Sattler K. Verification of long-term DMI–HIRLAM NWP model runs using urbanization and building effect parameterization modules // HIRLAM Newsletter. – 2008. – №53. – P. 50-60.

5. *Dudhia J.* A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front // *Mon. Wea. Rev.* 1993. – V.121. – P.1493-1513.
6. *Hong S.-Y., Pan H.-L.* Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model // *Mon. Wea. Rev.* – 1996. – V.124. – P. 2322-2339.
7. *Mlawer E. J.* Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave / E. J. Mlawer, S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, S. A. Clough // *Journal of Geophysical Researches.* - 1997. –V. 102. - P. 16663-16682.
8. *Dudhia J.* A multi-layer soil temperature model for MM5. – 1996. – P.49-50. (Preprints. / The sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop. Boulder, Colorado; 1996-06).
9. *Grell G.A.* Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parametrizations // *Mon. Wea. Rev.* – 1993. – V.121. – P. 764-787.
10. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Hólm E., Hoskins B.J., Isaksen I., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J.* The ERA-40 re-analysis // *Q.J.R.Meteorol.Soc.* – 2005. – V.131. – P.2961-3012.
11. *Маринин І.Л., Енгальчева О.Р.* Основні характеристики і просторове розподілення острова тепла г. Одеса // *Вісник Одеського державного екологічного університету.* –2010. –№10. – С. 135-142.
12. *Casati, B., Wilson L. J., Stephenson D.B., Nurmi P., Ghelli A., Pocerlich M., Damrath U., Ebert E. E., Brown B. G., Mason S.* Forecast verification: current status and future directions // *Meteorological Applications, Special Issue: Forecast Verification.* – 2008. – Vol.15, – P.3-18.

**Вплив альbedo на формування міського острова тепла.**

**Іванов С.В., Дранічер О.Р.**

*За допомогою атмосферній мезомасштабної моделі MM5 отримана оцінка впливу альbedo на термічний режим м.Одеса. Виконано два короткострокових чисельних експерименту з різними значеннями альbedo для урбанізованої території. Результати аналізуються на основі добового ходу температури повітря для міської та сільській місцевості та її відмінності у двох експериментах.*

**Ключові слова:** альbedo, міський острів тепла, термічний режим.

**The albedo effect to the urban heat island formation.**

**Ivanov S.V., Dranicher O.R.**

*The estimate of albedo influence on thermal regime over Odessa is performed by the atmospherical mesoscale model MM5. Two short numerical runs with different albedo values have been tested. The simulated outputs are evaluated for a diurnal cycle of air temperature for the urban and rural area and its differences between two runs.*

**Key words:** albedo, urban heat island, thermal regime of the city.