

Г.С. Ривин, Е.Г. Климова, А.И. Куликов

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОУСЛОВИЙ НА КАРТИНУ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ

Описана система математического моделирования атмосферных процессов, и проведена предварительная оценка возможных зон влияния на распределение аэрозолей в Новосибирском регионе. Такая оценка проводится с помощью построения обратных траекторий по климатическим метеоданным. Для расчета обратных траекторий применен алгоритм, основанный на методе Лагранжа. Полученные траектории близки к «средним» по этому же периоду траекториям и позволяют оценить характерные для каждого месяца области воздействия на Новосибирский регион.

Введение

В истории развития человеческого общества всегда было немало проблем, от успешного решения которых зависели его благосостояние и устойчивое развитие. В частности, устойчивое развитие общества должно учитывать как качество окружающей среды, так и ее климатические изменения. В свою очередь, на эти характеристики окружающей среды влияют изменения химического состава воздуха и подстилающей поверхности, обусловленные природными факторами и производственной деятельностью человека. Довольно сложной задачей являются оценка и учет влияния атмосферного аэрозоля, действие которого зависит не только от концентрации, цветовых свойств, распределения по высотам, но и от размеров составляющих его частиц. Дополнительные проблемы при этом возникают в связи с переносом (в том числе и дальним) атмосферных загрязняющих веществ.

Для решения задачи оценки воздействия природных и антропогенных факторов на состояние окружающей среды необходим комплексный подход, включающий в себя мониторинг состояния атмосферы и атмосферных аэрозолей, разработку систем математического моделирования атмосферных процессов и распространения примесей [1, 2]. Причем для оценки факторов, влияющих на экологическое состояние региона, необходимо как прямое моделирование, так и решение обратных задач, в частности построение обратных траекторий по фактическим метеорологическим данным. Кроме того, такое исследование должно вестись на основе тщательно спланированного вычислительного эксперимента [3].

Данная работа посвящена исследованию алгоритмов оценки влияния климатических метеоусловий на распространение аэрозолей в Сибирском регионе. Такая оценка производится на основе построения обратных траекторий по климатическим метеоданным.

Система математического моделирования и база данных

Комплексная система моделирования атмосферных процессов в своей основе была разработана в

Институте вычислительных технологий СО РАН в предыдущие годы и описана в ряде публикаций [4–9]. Основные компоненты этой системы следующие:

1. Модель атмосферы – 15 уровней по вертикали (до 10 мбар); область определения решения 7500×6300 км; метод решения соответствующих конечно-разностных уравнений основан на применении метода расщепления и нормальных «вертикальных мод».

2. Схема анализа метеоданных – бокс-вариант трехмерного многоэлементного метода оптимальной интерполяции.

3. Модель переноса газообразных и аэрозольных примесей – решение основано на методе расщепления с применением монотонных схем.

4. Блок визуализации для построения полей изолиний и векторных полей в различных картографических (стереографической, меркаторской, прямоугольной и ортографической) проекциях.

В настоящее время в рамках проекта «Аэрозоли Сибири» [10] разрабатывается комплексная система математического моделирования атмосферных процессов и экологического мониторинга Сибирского региона для решения задач охраны окружающей среды, проведения экспертных оценок антропогенного воздействия [11–12].

Важной составной частью этой системы являются данные измерений как для метеорологических полей, так и для газообразных и аэрозольных примесей. Для получения полной картины загрязнения по данным измерений в отдельных пунктах требуется разработка алгоритмов обработки этого типа данных.

В [13, 8] приведен обзор современных систем усвоения метеоданных, позволяющих по результатам наблюдений с привлечением гидротермодинамических моделей атмосферы получить пространственно-временное распределение метеополей и основных баз данных. Из обзора видно, что наиболее полной в настоящее время является база метеоданных, описанная в [14]. Она подготовлена в совместном проекте Национальных центров прогноза окружающей среды США (NCER) и Национального центра атмосферных исследований (NCAR). База включает в се-

бя как данные наблюдений, так и поля для всего земного шара за 1957–1996 гг., проанализированные с помощью несколько упрощенной для экономии времени обработки (удвоены только шаги по пространственным горизонтальным переменным) версии оперативной системы усвоения данных NCEP, которая использовалась в январе 1995 г.:

- комплексный контроль данных наблюдений;
- схема анализа, использующая спектральный метод статистической интерполяции, не требующая дополнительной инициализации;
- спектральная T62 (эквивалентное горизонтальное разрешение равно 210 км) модель атмосферы с 28 уровнями по вертикали.

Исходя из этого, нами выбрана база для подготовки необходимого архива метеоданных для Сибирского региона. В дальнейшем этот архив метеоданных будем называть «реанализ». Отметим, что в ряде метеоцентров также подготовлены такие архивы. Так, в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) реализован проект ERA (ECMWF Re-Analysis) [15] для создания архива метеоданных 1979–1993 гг. с помощью специальной версии оперативной системы усвоения данных ECMWF, которая включает:

- схему анализа (метод оптимальной интерполяции) с 6-часовым циклом,
- неадиабатическую схему нелинейной инициализации (5 вертикальных мод),
- спектральную T106 прогностическую модель атмосферы с 31 уровнем по вертикали.

Кроме того, работа по реанализу проводится в Data Assimilation Office (DAO) NASA's Goddard Space Flight Center, где подготавливается многолетний (март 1980 – февраль 1995) архив данных об атмосфере с горизонтальным разрешением 2° по меридиану и 2,5° по параллели (91×144) и 18 уровнями (1000–20 мбар) по вертикали для использования в климатических исследованиях, включая химию тропосферы [16].

Обсуждение первых результатов, полученных с помощью данных реанализа и плана дальнейшей работы, проходило на Первой Международной конференции по реанализу в рамках Всемирной программы по изменению климата [17].

В настоящее время проводится работа по созданию базы данных, включающей все эти компоненты, с использованием концепции комплексной обработки данных метеорологической и аэрозольной информации и применением опыта разработки системы усвоения метеоданных [9]. Важно отметить, что система развивается, причем не только модифицируются и совершенствуются ее основные блоки, но и идет ее расширение за счет начавшейся разработки базы данных «Аэрозоли Сибири» совместно с сотрудниками Института химической кинетики и горения СО РАН [11], а также работ по прямому и обратному моделированию распространения примесей.

Метод нахождения обратных траекторий

Важной проблемой является оценка областей, влияющих на состояние окружающей среды интересующего нас региона. С этой целью начата работа по построению обратных траекторий по фактическим и климатическим метеорологическим данным на примере г. Новосибирска. В качестве климатической метеорологической информации использованы данные из указанного выше архива «реанализ», усредненные для каждого месяца за период 1982–1994 гг. Построенные по таким данным траектории позволяют оценить типичные для каждого месяца среднеклиматические области воздействия на г. Новосибирск.

Построение обратных траекторий возможно на основе анализа синоптических карт и с помощью методов математического моделирования по данным численного (объективного) анализа. Первый метод, основанный на анализе синоптических карт, помимо положительных свойств, имеет определенные недостатки, связанные с тем, что восстанавливаются обратные траектории потока воздушных масс, а не частиц, скорость переноса которых (особенно по вертикали) отличается от скорости потока воздуха.

Так, в [18] приведено построение 6-суточных обратных траекторий по синоптическим картам поверхности 850 мбар для выяснения крупных регионов, откуда поступает воздух в атмосферу Российской Арктики (архипелаг Северная Земля и остров Врангеля), для двух весенних месяцев (март, апрель) за 10 лет наблюдений (1981–1990 гг.). Но обратные траектории атмосферного аэрозоля являются линиями в трехмерном пространстве, а не в двухмерном и, следовательно, не совпадают с приведенными в указанной выше работе. По этой причине в данной работе используется второй метод, а именно: для построения обратных траекторий атмосферного аэрозоля применен метод Лагранжа [19–21].

Опишем кратко алгоритм, используемый для расчета обратных траекторий. Пусть (λ, θ, p) – трехмерные координаты точки в сферической системе координат: λ – долгота, θ – широта, p – давление. Тогда уравнение для изменения координат по времени имеет вид:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{U(\lambda, \theta, p, t)}{r \cos\theta}, \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V(\lambda, \theta, p, t)}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = W(\lambda, \theta, p, t). \quad (3)$$

Представим уравнения (1)–(3) в конечно-разностном виде:

$$\lambda^{n+1} - \lambda^n = \tau U(\lambda^{n+1/2}, \theta^{n+1/2}, p^{n+1/2}, t^{n+1/2}) / (r \cos\theta^n); \quad (4)$$

$$\theta^{n+1} - \theta^n = \tau V(\lambda^{n+1/2}, \theta^{n+1/2}, p^{n+1/2}, t^{n+1/2})/r; \quad (5)$$

$$p^{n+1} - p^n = \tau W(\lambda^{n+1/2}, \theta^{n+1/2}, p^{n+1/2}, t^{n+1/2}), \quad (6)$$

где τ – шаг по времени. Из (4)–(6) следуют уравнения для вычисления значений $(\lambda^n, \theta^n, p^n)$ по $(\lambda^{n+1}, \theta^{n+1}, p^{n+1})$:

$$\lambda^n = \lambda^{n+1} - \tau U\left(\frac{\lambda^n + \lambda^{n+1}}{2}, \frac{\theta^n + \theta^{n+1}}{2}, \frac{p^n + p^{n+1}}{2}, t^n + \frac{\tau}{2}\right) / \left(r \cos \frac{\theta^n + \theta^{n+1}}{2V}\right); \quad (7)$$

$$\theta^n = \theta^{n+1} - \tau V\left(\frac{\lambda^n + \lambda^{n+1}}{2}, \frac{\theta^n + \theta^{n+1}}{2}, \frac{p^n + p^{n+1}}{2}, t^n + \frac{\tau}{2}\right)/r; \quad (8)$$

$$p^n = p^{n+1} - \tau W\left(\frac{\lambda^n + \lambda^{n+1}}{2}, \frac{\theta^n + \theta^{n+1}}{2}, \frac{p^n + p^{n+1}}{2}, t^n + \frac{\tau}{2}\right). \quad (9)$$

Значения U, V, W брались из климатических данных архива «реанализ». Неявные уравнения (7)–(9) решались методом простой итерации. Значения U, V, W в точке $(\lambda^{n+1/2}, \theta^{n+1/2}, p^{n+1/2})$ вычислялись методом кубической бисплайновой интерполяции; по

вертикальной координате производилась линейная интерполяция по $\ln(p)$. Расчет обратных траекторий производился на 10 сут назад с $\tau = 1$ ч.

Возможная картина распространения аэрозолей в Сибирском регионе

На основе описанного в предыдущем пункте алгоритма были произведены расчеты обратных траекторий по климатическим данным. Под климатическими понимаются данные за календарный месяц, усредненные за период 1982–1994 гг. Полученные по таким данным траектории близки к «средним» по этому же периоду траекториям. Они позволяют оценить характерные для каждого месяца области воздействия на Новосибирск.

На рис. 1 приведены обратные траектории, построенные по климатическим данным для периодов январь–апрель (а), май–август (б), сентябрь–декабрь (в) соответственно. На этих рисунках цифрами обозначены номера месяцев. На рис. 1, г приведены обратные траектории для июля 1982–1994 гг., цифрами обозначены номера годов.

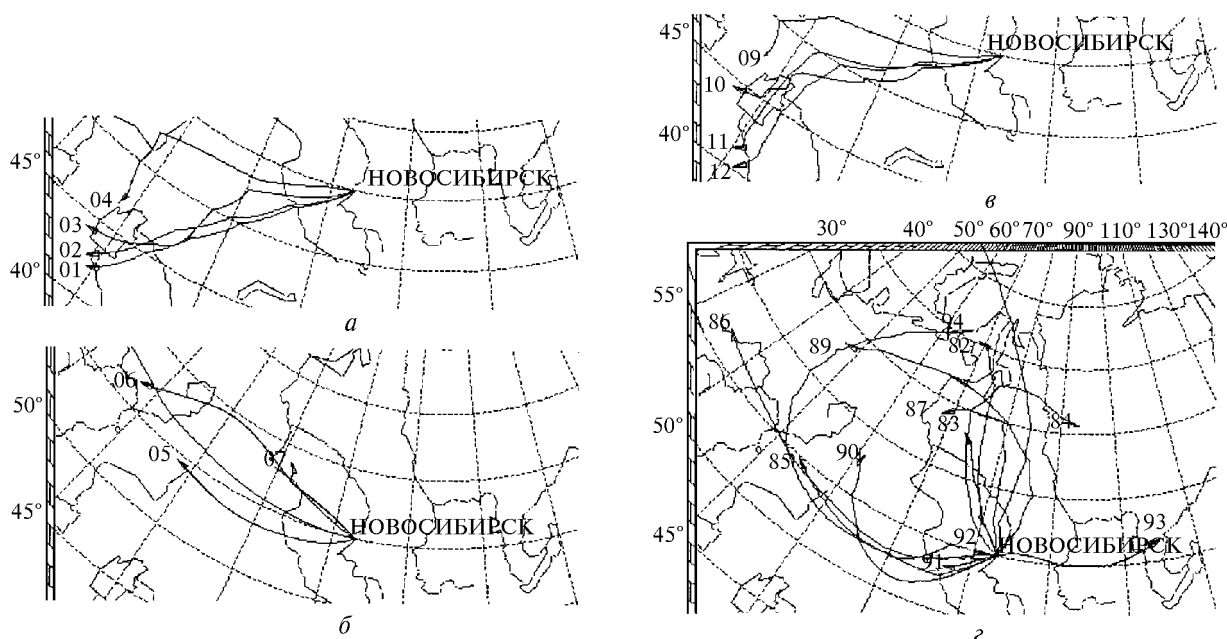


Рис. 1. Обратные траектории для 1982–1994 гг.

На рис. 2 и 3 для января и июля приведены климатические поля вертикальной компоненты скорости ветра для поверхности 850 мбар. Отметим, что рис. 1 получен с помощью средств визуализации, разработанных в Институте вычислительных технологий СО РАН [5], а рис. 2, 3 – с помощью системы визуализации GrADS, разработанной B. Doty (Center Ocean–Land–Atmosphere Studies, Calverton, MD, USA), включенной в состав NCEP/NCAR Reanalysis Climatology AMS CD-ROM [14].

Как видно из рис. 1, для первого и третьего периодов характерно движение воздушных масс с юго-

запада на северо-восток, причем все траектории проходят через Аральский регион. Для второго периода характерно западно-восточное направление движения воздушных масс. Следует заметить, что в зимний период (см. рис. 2) в Аральском регионе наблюдается подъем воздушных масс, а в Новосибирском регионе – опускание. В летний же период (см. рис. 3) в Восточно-Европейской части России наблюдается подъем воздушных масс, а в Новосибирском регионе – опускание.

Таким образом, полученные характерные области влияния на Новосибирский регион хорошо согласуются с вертикальным движением воздушных масс.

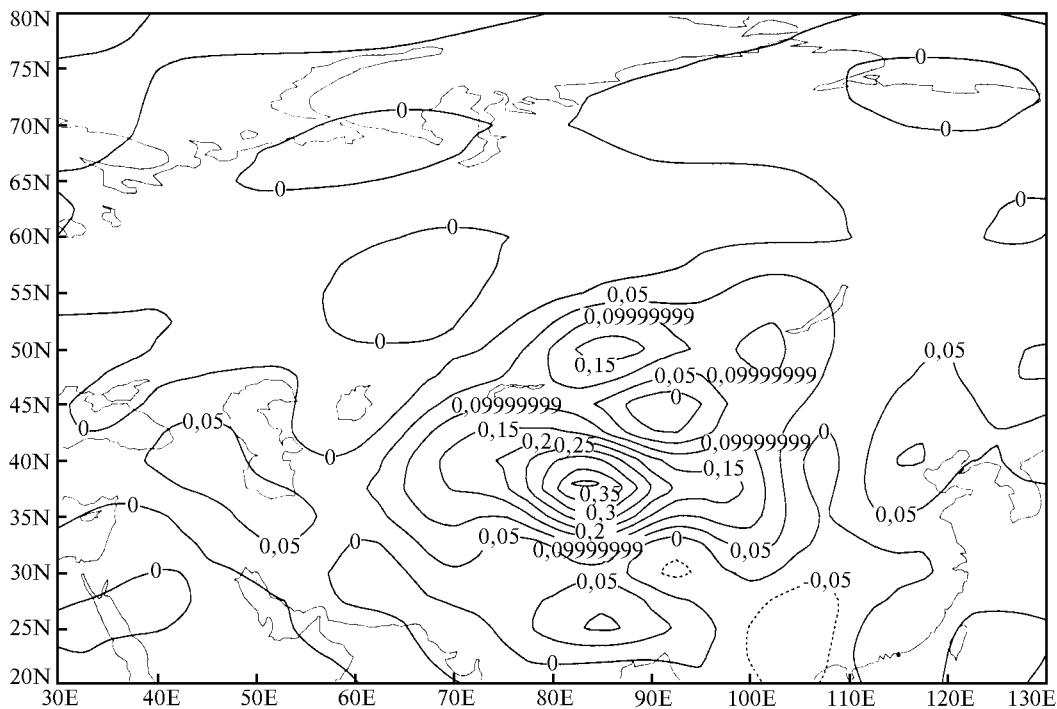


Рис. 2. Климатические значения вертикальной компоненты скорости ветра (январь)

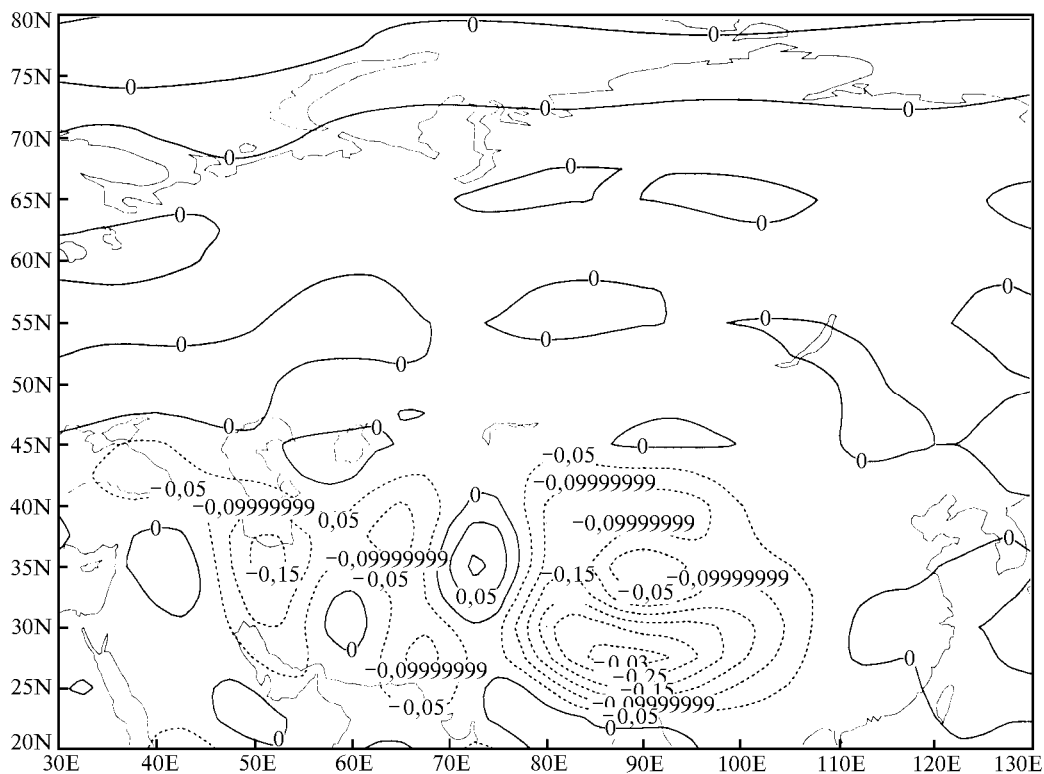


Рис. 3. Климатические значения вертикальной компоненты скорости ветра (июль)

Заклучение

В статье рассмотрена система математического моделирования атмосферных процессов и представлена предварительная оценка возможных зон влия-

ния на распределение аэрозолей в Новосибирском регионе. В дальнейшем предполагается более детальное изучение методики получения обратных траекторий с учетом скоростей оседания аэрозольных частиц разных размеров и механизма турбу-

лентного перемешивания. Кроме расчетов с климатическими данными будут также проведены расчеты по фактическим метеорологическим данным.

Считаем своим приятным долгом выразить благодарность проф. К.П. Куценогому (Институт химической кинетики и горения СО РАН) за полезное обсуждение работы и директору Центра моделирования окружающей среды НСЕР доктору Е. Калнаи за предоставленные нам материалы по реанализу и CD-ROM с климатической информацией.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 95-05-15581).

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 317 с.
2. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
3. Шокин Ю.И., Ривин Г.С., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. // Вычислительные технологии. 1992. № 3. С. 12–33.
4. Климова Е.Г., Ривин Г.С. // Метеорология и гидрология. 1992. № 9. С. 16–23.
5. Ривин Г.С., Куликов А.И. // Вычислительные технологии. 1993. № 4. С. 155–167.
6. Ривин Г.С., Климова Е.Г., Медведев С.Б., Фомин В.М., Воронина П.В., Куликов А.И. // Математические проблемы экологии. Новосибирск: Изд. ИМ СО РАН, 1994. С. 90–94.

7. Ривин Г.С., Медведев С.Б. // Метеорология и гидрология. 1995. № 5. С. 13–22.
8. Ривин Г.С. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 780–785.
9. Климова Е.Г., Ривин Г.С. // Метеорология и гидрология. 1996. № 12. С. 19–26.
10. Куценогий К.П. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1015–1021.
11. Ривин Г.С., Куценогий К.П., Климова Е.Г., Воронина П.В., Смирнова А.И. // Оптика атмосферы и океана. 1997. № 6. С. 610–615.
12. Ривин Г.С., Воронина П.В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 623–633.
13. Климова Е.Г., Ривин Г.С. // Вычислительные технологии. 1993. № 4. С. 111–116.
14. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. V. 77. P. 437–471.
15. The ECMWF Re-Analysis (ERA) Project, на странице в Интернете по адресу: <http://www.ecmwf.int/data/reanalysis.html>
16. Schubert S., Rood R., Pfandner J. // Bulletin of the American Meteorological Society. 1993. V. 74. P. 2331–2342.
17. Rivin G.S., Klimova E.G. // Abstract Digest of the First International Conference on Reanalysis. 1997. 27–31 October. Silver Spring, Maryland USA. P. 162.
18. Виноградова А.А., Егоров В.А. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1996. № 6. С. 796–802.
19. Белоусов С.Л., Пагава Т.С. // Метеорология и гидрология. 1990. № 9. С. 47–51.
20. Белоусов С.Л., Юсупов Ю.И. // Метеорология и гидрология. 1991. № 12. С. 41–48.
21. Белоусов С.Л., Беркович Л.В., Юсупов Ю.И. // Метеорология и гидрология. 1994. № 11. С. 33–48.

Институт вычислительных технологий СО РАН,
г. Новосибирск

Поступила в редакцию
8 января 1998 г.

G.S. Rivin, E.G. Klimova, A.I. Kulikov. An Evaluation of Influence of Climatic Meteorological Conditions on a Picture of Distribution of Aerosols in Siberian Region.

The system of mathematical simulation of atmospheric processes is described and the tentative estimation of possible zones of influence on distribution of aerosols in Novosibirsk region is conducted. Such evaluation is carried out with the help of constructions of inverse trajectories over climatic meteorological data. The algorithm based on the method of Lagrange is applied to calculation of inverse trajectories from the climatic data. The trajectories, obtained from such data, are close to «mean» over the same period and allow evaluation of characteristic monthly areas of influence on Novosibirsk region.