

**Висновки.** Авторами обґрунтовано методику довгострокового прогнозу надходження поверхневих вод з водозборів лиманів Хаджибей і Куяльник, що дозволяє на основі поточного прогнозування в кожному році надавати кількісну оцінку ступеня наповнення водойм лиманів поверхневими водами з довготерміновою завчасністю (порядку 15-25 діб). В методиці прогнозу передбачено встановлення ймовірності настання у багаторічному розрізі припливу весняних вод до замкнених водойм лиманів.

Оцінені можливі значення високих відміток води у Хаджибейському лимані за умови виникнення весняних водопіль та дощових паводків розрахункової виняткової ймовірності настання ( $P=1\%$ , тобто повторюваністю 1 раз у 100 років). Для Куяльницького лиману екологічно небезпечна ситуація навпаки, пов'язана з обмілінням лиману при недостатньому надходженні поверхневих вод (через витрачання їх на заповнення ставків і малих водосховищ в басейні р. Великий Куяльник).

Прогнозна і розрахункова схеми весняного наповнення Хаджибейського і Куяльницького лиманів впроваджені в оперативну діяльність сектору річкових прогнозів гідрометцентру Чорного та Азовського морів (м. Одеса) у вигляді програмного комплексу для випуску щорічного прогнозу шарів стоку водопіль, розрахунку наповнення лиманів поверхневими водами для прийняття рішень по здійсненню заходів протипаводкової безпеки у весняний період року.

#### Джерела та література:

1. Лиманы Северного Причерноморья / В. С. Полищук, Ф. С. Замбриборщ, В. М. Тимченко и др.; отв. ред. О. Г. Миронов; АН УССР, Ин-т гидробиологии. – К. : Наукова думка, 1990. – 204 с.
2. Старушенко Л. И. Причерноморские лиманы Одесщины и их рыбохозяйственное использование / Л. И. Старушенко, С. Г. Бушуев; ОФНБЮМ. – Одесса : Астропринт, 2001. – 65 с.
3. Водный режим Хаджибейского лимана и мероприятия по его регулированию / М. И. Исаков, Б. Я. Сирота, Н. Ф. Решетников, Н. Н. Решетинский; Одесская региональная Академия наук (ОРАН). – С. 153-157.
4. Гопченко Є. Д. Сучасні морфометричні характеристики Куяльницького лиману / Є. Д. Гопченко, О. М. Гриб // Весник Гідрометцентру Чорного і Азовського морей / Гос. гідрометеорологічна служба України. – 2009. – № 2 (10) – С. 186-193.
5. Гопченко Є. Д. Можливості застосування просторових моделей для прогнозування максимального стоку весняного водопілля при обмеженості гідрологічних спостережень / Є. Д. Гопченко, Ж. Р. Шакірзанова // Причорноморський екологічний бюлетень : наук.-практ. журнал. – Одеса : Вид. ТОВ "ІНВАЦ", 2007. – № 2 (24). – С. 63-66.
6. Гопченко Є. Д. Довгострокове прогнозування водності Хаджибейського лиману та оцінка його наповнення поверхневими водами у весняний період року / Є. Д. Гопченко, Ж. Р. Шакірзанова // Весник Гідрометцентру Чорного і Азовського морей / Гос. гідрометеорологічна служба України. – 2009. – № 2 (10). – С. 169-185.
7. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.

**Шидловская А.А.**

**УДК 911.9**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ И МАКСИМАЛЬНЫХ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОД**

Ветер является одним из перспективных экологически чистых и практически неисчерпаемых энергетических ресурсов, все шире используемых человечеством. Он в то же время является одной из основных причин возникновения природных чрезвычайных ситуаций [1]. Поэтому совершенствование методик моделирования межгодовых изменений его характеристик является актуальной проблемой физической географии, экологической безопасности, охраны окружающей среды, а также энергетики.

Одной из важнейших, с точки зрения ветроэнергетики, характеристик скорости ветра является его среднемесячное значение. Ее межгодовые изменения на той или иной местности определяют эффективность функционирования на них ветровых электростанций. Поэтому прогнозы тенденций этого процесса необходимо учитывать при принятии решений об их создании.

Характеристикой ветра, определяющей степень его опасности, как фактора способствующего возникновению чрезвычайных ситуаций, является его и максимальное среднесуточное значение его скорости.

Мониторинг изменчивости указанных характеристик поля скорости ветра ныне осуществляется на 184 метеостанциях Украины. На многих из них он начался в первой половине XX века, а полученные результаты представлены в <http://www.tutiempo.net/en/Climate>.

Их анализ свидетельствует о том, что межгодовые изменения среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра всюду представляют собой процессы нестационарные, которые могут рассматриваться как сумма большого числа квазигармонических составляющих.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ И МАКСИМАЛЬНЫХ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОД**

Установлено, что к числу значимых факторов временной изменчивости ветрового режима в различных регионах Украины могут относиться глобальные, а также многочисленные региональные и крупномасштабные процессы в климатической системе планеты [2].

При этом вопрос о том, какие именно процессы наиболее существенно влияют на изменчивость среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра, в том или ином регионе Украины, до сих пор остается изученным недостаточно. Это существенно снижает эффективность их моделирования с использованием традиционного метода множественной регрессии [3].

В случаях, когда моделируемый процесс нестационарный и обладает свойствами полигармонического, как альтернативу данному методу, предложено использовать метод нестационарных мод [4]. Показана эффективность его применения при моделировании изменений таких характеристик метеоусловий, как среднемесячные значения температур воздуха, общего содержания озона и месячных сумм атмосферных осадков.

В [4] установлено, что результаты моделирования характеристик половодий на реках Украины, полученные с помощью упомянутого метода, качественно соответствуют результатам, полученным с помощью метода множественной регрессии. Это позволяет предполагать, что метод нестационарных мод может быть эффективно применен и в задачах моделирования изменчивости среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра. Вместе с тем ранее справедливость данного предположения не проверялась, вследствие чего оценка возможностей применения данного метода в указанных задачах представляет существенный теоретический и практический интерес.

Наиболее актуальной подобная оценка является для экономически развитых индустриально-аграрных регионов, в которых, как перспективное направление решения их энергетических проблем, принято рассматривать развитие ветроэнергетики. Одним из них является Запорожская область Украины, где наибольшие значения среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра приходятся на зимние месяцы.

Учитывая это, целью данной работы является оценка возможностей применения метода нестационарных мод в задачах математического моделирования межгодовых изменений среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра в зимние месяцы на территории Запорожской области.

Объектом исследования является ветровой режим на территории Запорожской области.

Предметом исследования являются возможности моделирования межгодовых изменений среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра с использованием метода нестационарных мод.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1. Выбор репрезентативных пунктов на территории Запорожской области.
2. Оценка значений среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра в каждом из репрезентативных пунктов, имевших место в зимние месяцы, в период с 1973 по 2008 гг.
3. Изучение статистических свойств межгодовых изменений рассматриваемых характеристик и выбор их математических моделей.
4. Математическое моделирование изучаемых процессов с использованием метода нестационарных мод.

**Методика исследования и фактический материал.**

Первая задача решалась с учетом рельефа территории Запорожской области. При этом данные о рельефе были получены из электронного атласа карт Генерального штаба СССР масштаба 1:50000.

Поскольку наблюдения за ветровым режимом на территории Запорожской области осуществляются ныне всего на одной метеостанции, для оценки значений изучаемых характеристик в пунктах, где наблюдения не проводились, осуществлялась их интерполяция. В качестве исходных данных использованы сведения о значениях среднемесячных и максимальных среднесуточных значений скоростей ветра в пунктах Восточной Европы, показанных на рисунке 1, полученные из <http://www.tutempo.net/en/Climate>.

Как видно из рисунка 1, при интерполяции учитывались не все метеостанции Украины. Данные, полученные на прочих метеостанциях, использовались при оценке погрешностей интерполяции. Установлено, что значения абсолютных погрешностей интерполяции изучаемых характеристик на всей территории Запорожской области не превышают 7% от их максимальных значений, что свидетельствует о применимости ее результатов в решаемой задаче. Интерполяция осуществлялась с использованием метода триангуляции Делоне [5].

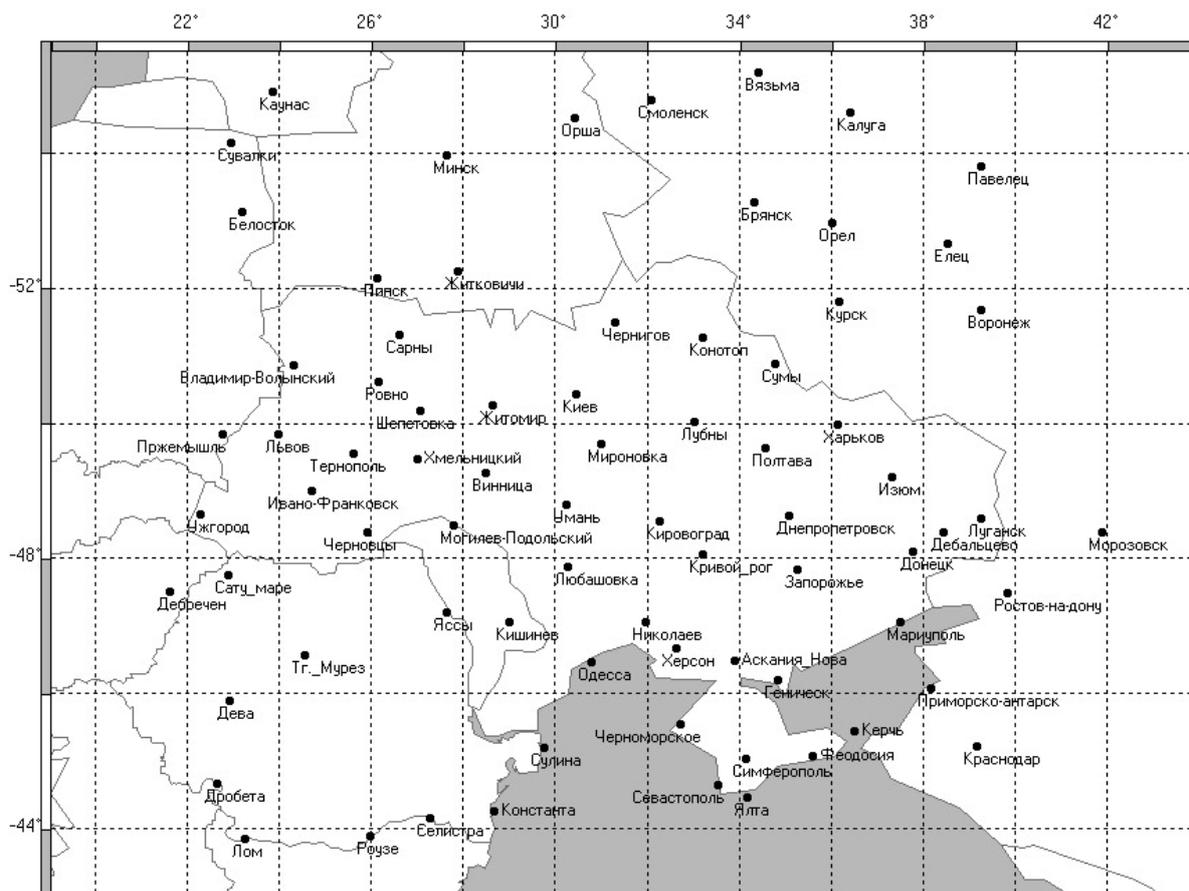


Рис. 1. Расположение метеостанций, учитываемых при интерполяции.

В ходе решения третьей задачи осуществлялся анализ энергетических спектров различных фрагментов временных рядов межгодовых изменений среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра, зафиксированных на учитывавшихся метеостанциях Украины и России, которые имели одинаковую длину, но отличались годом своего начала.

Проверялось предположение, согласно которому рассматриваемые процессы во все месяцы являются многомодовыми, а амплитуды и периоды соответствующие их максимумам существенно зависят от года начала этих фрагментов. При этом различия оценок сравнивались со значением среднеквадратического отклонения их ошибок, обусловленных ограниченностью выборки, рассчитываемой по формуле Бартлетта.

При решении четвертой задачи применялся метод нестационарных мод. В качестве математической модели каждого изучаемого процесса использовалось соотношение:

$$X(t) = Tx(t) + K(t) + n(t), \tag{1}$$

где  $Tx(t)$  - линейный тренд рассматриваемого процесса;

$n(t)$  - стационарный гауссовый шум измеренный с нулевым средним;

$K(t)$  - коррелированная стационарная составляющая с нулевым средним, зависящая от предыстории  $x(t)$ ;

$$K(t) = \sum_{k=1}^N A_k(t) \sin[\omega_k(t) + \varphi_k], \tag{2}$$

где:  $A_k(t)$  - мгновенная амплитуда

$k$  - моды процесса ( $k=0, 1, 2$ , и т.д.).

$$A_k(t) = \sum_{i=0}^{M_a} a_{ki} \cdot t^i$$

$\omega_k(t)$  – ее мгновенная фаза, являющаяся нелинейной функцией времени;

$$\omega_k(t) = \sum_{i=0}^{M_\omega} \omega_{ki} \cdot t^i$$

$M_a$  и  $M_\omega$  - целые положительные константы;

$a_{ki}$  и  $w_{ki}$  – действительные числа, зависящие от рассматриваемого процесса и номера его моды  $k$ ;

$\varphi_k$  - начальная фаза моды с частотой  $w_k(t)$ , являющаяся неизвестной действительной константой.

Для идентификации параметров подобной математической модели может быть использована процедура численной оптимизации [5] критерия:

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ И МАКСИМАЛЬНЫХ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОД

$$R = \frac{E\{(X(t) - Tx(t)) \cdot A_k(t) \sin(\omega_k(t) + \varphi_k)\}}{\sqrt{E\{(X(t) - Tx(t))^2\} \cdot E\{(A_k(t) \sin(\omega_k(t) + \varphi_k))^2\}}}$$

где  $E\{\}$  – оператор математического ожидания.

Эта процедура реализуется с использованием метода случайного поиска [5].

**Результаты и их анализ.**

Расположение пунктов на территории Запорожской области, которые рассматривались, как репрезентативные показано на рисунке 2.

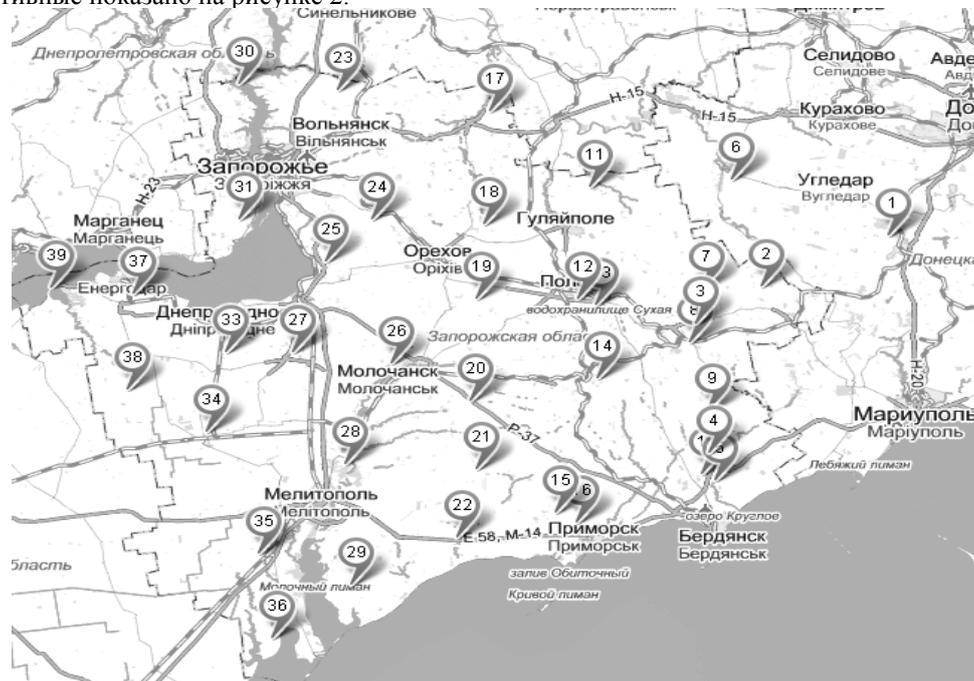


Рис. 2. Расположение репрезентативных пунктов на территории Запорожской области.

Из рисунка 2 следует, что исследуемые пункты практически равномерно расположены на территории Запорожской области. Поэтому в совокупности они отображают особенности рассматриваемых процессов репрезентативно.

Оценка значений среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра в каждом из репрезентативных пунктов, была произведена для месяцев декабря, января и февраля каждого года, за период с 1973 по 2008 гг.

Анализ статистических свойств зависимостей от времени среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра в каждом репрезентативном пункте и в каждом месяце показал, что все рассматриваемые процессы являются многомодовыми и могут считаться нестационарными с достоверностью не ниже 0.99. Характер зависимости от времени каждого их параметра позволяет описывать ее гладкой функцией времени. Для любого момента времени существует интервал, одна из границ которого относится к прошлому, а вторая – к будущему, для которого подобная неизвестная зависимость может быть аппроксимирована с заданной точностью известной полиномиальной функцией. Поэтому метод нестационарных мод применим для решения рассматриваемых задач.

С использованием упомянутого метода идентифицированы параметры математических моделей изучаемых процессов для всех репрезентативных пунктов. В качестве примера в таблице 1 приведены параметры подобных моделей среднемесячных скоростей ветра в январе, соответствующих 5 пунктам территории Запорожской области.

Таблица 1. Параметры идентифицированных моделей среднемесячных скоростей ветра в январе, для некоторых пунктов Запорожской области.

№ пункта	1	2	3	4	5
Широта	-47,488	-47,616	-46,768	-47,552	-47,952
Долгота	37,139	36,775	36,289	35,366	32,984
Амплитуда первой моды $a_{01}$	10,009	8,313	8,218	8,230	7,125
Период первой моды	5	5	2	2	4
Скорость изменения частоты 1-й моды $w_{12}$	-0,018	-0,018	0,089	0,090	-0,031
Начальная фаза первой моды	5,95	5,963	4,034	3,770	2,576
Амплитуда второй моды $a_{02}$	8,611	7,035	6,734	4,401	8,034
Период второй моды	6	3	3	4	2
Скорость изменения частоты 2-й моды $w_{22}$	0,013	-0,034	0,040	-0,031	0,067

№ пункта	1	2	3	4	5
Начальная фаза второй моды	0,245	1,646	0,308	1,935	4,021
Амплитуда третьей моды $a_{01}$	15,685	15,399	3,687	2,045	2,203
Период третьей моды	9	9	6	6	9
Скорость изменения частоты 3-й моды $w_{33}$	-0,014	-0,014	-0,020	0,013	-0,014
Начальная фаза третьей моды	5,592	5,517	6,101	5,749	5,881

В качестве примера на рисунке 3 представлены зависимости от времени на территории Запорожской области межгодовых изменений среднемесячных скоростей ветра в январе, в пункте с координатами N: 47°4,32'; E: 36°52,35'.

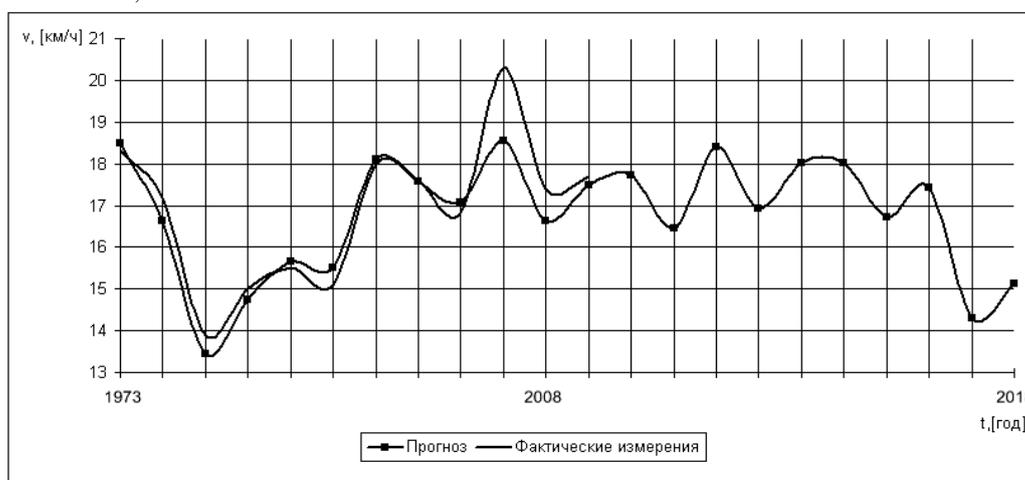


Рис. 3. Зависимость от времени на территории Запорожской области межгодовых изменений среднемесячных скоростей ветра в январе, в пункте с координатами N: 47°4,32'; E: 36°52,35'.

Как видно из рисунка 4, расположение максимумов и минимумов рассматриваемого процесса, а также результата его моделирования, практически совпадают. Из этого следует, что предложенная методика моделирования может быть использована при прогнозировании его межгодовых изменений.



Рис. 4. Зависимость от времени на территории Запорожской области межгодовых изменений максимальных среднесуточных скоростей ветра в январе, в пункте с координатами N: 46°54,72'; E: 36°45,05'.

На рисунке 4 в качестве примера приведены зависимости от времени максимальных среднесуточных скоростей ветра в пункте Запорожской области с координатами N: 46°54,72'; E: 36°45,05' в январе. Как следует из рисунка, модельная зависимость удовлетворительно соответствует фактической.

Адекватность результатов моделирования была оценена с помощью критерия Стьюдента. Установлено, что значения коэффициента корреляции всех модельных и фактических зависимостей превосходят 99% порог достоверной корреляции, что свидетельствует о высоком качестве моделирования.

Из рисунка 4 нетрудно видеть, что математические модели изучаемых процессов, идентифицированные с помощью метода нестационарных мод, могут быть использованы и для их прогнозирования. Вместе с тем вопрос о точности подобных прогнозов нуждается в дополнительном изучении.

Таким образом, на примере Запорожской области установлено, что метод нестационарных мод может быть использован в задачах мониторинга межгодовых изменений среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра в зимние месяцы над ее территорией.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ И МАКСИМАЛЬНЫХ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОД**

Параметры идентифицированных математических моделей и их точность существенно зависят от месяца, в котором рассматривается изучаемый процесс, а также расположения пункта, для которого осуществляется его мониторинг.

Предложенная методика может быть рекомендована для использования и в других регионах мира, где ряды наблюдений за динамикой среднемесячных и максимальных среднесуточных скоростей ветра обладают необходимой продолжительностью.

**Источники и литература:**

1. Рева Г. В. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2003 році / Г. В. Рева, С. В. Поляков, Б. Є. Патон // Чорнобильінтерінформ. – К., 2004. – 434 с.
2. Ліпінський В. М. Клімат України / В. М. Ліпінський. – К. : Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
3. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия = Applied Regression Analysis / Н. Дрейпер, Г. Смит. – 3-е изд. – М. : Диалектика, 2007. – 912 с.
4. Чипига А. Ф. Анализ методов случайного поиска глобальных экстремумов многомерных функций / А. Ф. Чипига, Д. А. Колков // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 2 – С. 24-26.
5. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск : Изд-во Томского гос. ун-та, 2002. – 128 с.