

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА БЕЛАРУСИ НА БАЗЕ АНСАМБЛЕВОГО ПОДХОДА

И.С. Пармасенок¹, Б. Гайер², В.И. Мельник¹

¹Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, Республика Беларусь, г. Минск

²Institute for Coastal Research of Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Germany, Geesthacht

Введение

Исследования климата Беларуси выполняются усиленными темпами, и их результаты становятся более актуальными и востребованными. Это связано с длительным положительным трендом температуры воздуха, увеличением повторяемости опасных метеорологических явлений на территории страны и их последствиями для погодозависимых отраслей экономики.

Наиболее достоверными исходными данными для анализа изменения климата принято считать материалы инструментальных измерений на гидрометеорологической наблюдательной сети. Эти данные проходят строгий контроль качества и проверку на однородность рядов, поэтому их использование закономерно лежит в основе всех климатических исследований. Однако малое количество метеорологических станций с длительными рядами наблюдений и их неравномерное размещение по территории страны в некоторых случаях создают значительные затруднения для климатических исследований.

Станционные данные описывают гидрометеорологический режим в точке и не могут быть действительны на большом расстоянии от нее, особенно это касается атмосферных осадков, выпадение которых отличается пространственной неоднородностью. В

таких случаях более эффективным и более надежным способом является использование расчетных данных, полученных с использованием глобальных и региональных климатических моделей. Такие данные отражают пространственное распределение климатических характеристик и позволяют рассчитывать статистические параметры для конкретных регионов (административных районов, речных бассейнов, агроклиматических зон и др.).

Исследования климата Беларуси с использованием модельных расчетов ведутся продолжительное время по нескольким направлениям. В первую очередь климатические оценки территории Беларуси выполняются в составе более крупных регионов, которые являлись предметом исследований в рамках крупных научных проектов, связанных с моделированием климата (CMIP3, CMIP5, Prudens, Ensemble и др.) [5–7, 9–12].

Вследствие небольшой площади Беларуси и ее размещения, территория страны включалась в исследуемые домены как европейских ученых, так и российских.

В настоящее время наиболее актуальные модельные данные с высоким пространственным разрешением предоставляет проект EURO-CORDEX. На основании этих данных был выполнен детальный анализ будущих изменений климата в Европе [8]. Согласно проведенным исследованиям, к концу 21 столетия ожидается статистически значимое увеличение температуры воздуха и осадков на территории Европы, и в том числе Беларуси. На территории Российской Федерации также активно проводятся исследования будущей климатической изменчивости с помощью региональных моделей [1–3], часто такие исследования охватывают и территорию Беларуси.

В то же время в Беларуси в течение длительного времени проводятся исследования изменения климата с учетом использования различных моделей и выполняется оценка их достоверности [4]. Проведенные исследования показали, что в Беларуси ожидаются увеличение основных метеорологических параметров к концу 2100-х гг. и величина их изменения связана с концентрацией парниковых газов.

Методика исследования

Исходя из доступности модельных данных, для исследования были использованы значения температуры воздуха и осадков, а также рассчитаны дополнительные характеристики и климатические индексы. Далее был определен перечень (ансамбль) глобальных и региональных климатических моделей для получения прогнозных величин. В настоящее время данные для территории Европы с высоким пространственным и временным разрешением предоставляются консорциумом EURO-CORDEX, который является подпроектом Всемирной климатической программы ВМО и включает в себя около 30 научных институтов. Для оценки будущих изменений температуры воздуха и осадков оказалось возможным использование расчетов по 40 комбинациям глобальных и региональных климатических моделей с пространственным разрешением 50 км для различных сценариев концентрации парниковых газов. Перечень используемых глобальных и региональных моделей приведен в таблице.

Консорциум EURO-CORDEX для своих расчетов использует сценарии концентраций парниковых газов семейства RCP (Representative Concentration Pathways) на конец 21 столетия (согласно отчету Intergovernmental Panel Climate Change), в отличие от предыдущих аналогичных проектов, которые использовали сценарии, основанные на содержании эмиссий парниковых газов и социально-экономических показателях (Special Report on Emissions Scenarios).

Для выполнения настоящих расчетов были приняты сценарии RCP8.5 (что соответствует концентрации 1370 p.p.m), RCP4.5 (650 p.p.m) и RCP2.6 (490 p.p.m).

Для анализа будущих изменений климата был принят расчетный период 2011–2100 гг. Для сравнения с текущим состоянием и вычислением отклонений метеорологических параметров от нормы был принят исторический период 1971–2000 гг. Выбор исторического периода полагался на последние рекомендации ВМО, согласно которым для климатических исследований следует принимать исторический период с 1980 по 2010 г. Однако вследствие отсутствия расчетных исторических данных за последние 5 лет было решено сместить границы исторического периода.

Перечень глобальных и региональных моделей, комбинации которых использовались в исследовании

	Расчет температуры	Расчет осадков
Глобальные модели	ICHEC-EC-EARTH MOHC-HadGEM2-ES MPI-M-MPI-ESM-LR CCCma-CanESM2 NCC-NotESM1-M NOAA-GFDL-FDL-SM2M MIROC-MIROC5 CSIRO-QCCCCE-CSIRO-Mk3-6-0 CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 IPSL-PSL-CM5A-MR	CSIRO-QCCCCE-CSIRO-Mk3-6-0 NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M ICHEC-EC-EARTH CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 MPI-M-MPI-ESM-LR CCCma-CanESM2 MIROC-MIROC5 IPSL-IPSL-CM5A-MR MOHC-HadGEM2-ES NCC-NotESM1-M ICHEC-EC-EARTH
Региональные модели	SMHI-RCA4 CLMcom-CCLM4- 8-17 DMI-HIRHAM5 KNMI-RACMO22E IPSL-INNERIS-WRF331F HMS-ALADIN52	SMHI-RCA4 CLMcom-CCLM4-8-17 IPSL-INNERIS-WRF331F KNMI-RACMO22E DMI-HIRHAM5 HMS-ALADIN52

Результаты расчетов

В результате выполненных расчетов по ансамблю моделей были получены следующие расчетные величины:

1) средние годовые и сезонные значения температуры воздуха и их экстремумы за период 2011–2100 гг., отклонения среднегодовой и сезонной (зима: декабрь–февраль, весна: март–май, лето: июнь–август, осень: сентябрь–ноябрь) температуры воздуха за период 2011–2100 гг. от исторического периода 1971–2000 гг., средние годовые и сезонные величины за последовательные десятилетия для жарких дней и вегетационного периода, годовые и сезонные значения жарких дней, теплых дней, холодных дней, тропических ночей, морозных и жарких периодов, начало и продолжительность вегетационного периода за период 2011–2100 гг.;

2) средние годовые и сезонные суммы осадков и их экстремумы за период 2011–2100 гг., отклонения среднегодовых и сезонных сумм осадков воздуха за период 2011–2100 гг. от исторического периода 1971–2000 гг., средние годовое и сезонное количество дней с высокими суммами осадков за последовательные десятилетия, годовые и сезонные значения количества дней с осадками 0,1, 1,0 и 20 мм, повторяемость засушливых периодов.

В первую очередь при анализе модельных данных рассматривалась направленность процессов изменения, т.е. оценивалась согласованность расчетов моделей из ансамбля в увеличении или уменьшении прогнозируемой величины. В случаях, когда 66 % моделей показывали одинаковую направленность процессов, изменения считались стабильными (или робастными). В случае расчетов применительно к территории Беларуси прогнозируемые процессы в большинстве случаев являлись робастными, т. е. расчеты большинства моделей были согласованными.

Для обобщения результатов расчетов вычислялись средние величины для $2/3$ разброса значений, т. е. отсекались хвосты ранжированного ряда, которые находились за пределами заданного разброса. Также вычислялась медиана, и далее сравнивались результаты статистической обработки. В итоге в большинстве случаев средние значения в пределах $2/3$ разброса и значения медианы

оказались практически одинаковыми и в редких случаях отличались незначительно. Поэтому в большинстве расчетов в качестве обобщающей характеристики использовалась медиана.

Согласно полученным результатам по большинству моделей, ожидается увеличение температуры воздуха в Беларуси в целом за год и в каждом сезоне (рис. 1 и 2). Однако величина изменения варьируется по сезонам и в зависимости от сценария концентрации парниковых газов. Наибольшие значения увеличения температуры воздуха за год и по сезонам получены для сценария RCP8.5. В среднем по ансамблю ожидается увеличение среднегодовой температуры на $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; результаты по отдельным моделям колеблются от 1 до $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При анализе сезонных величин наибольшие значения увеличения температуры воздуха получены для зимнего сезона. Эти значения по ансамблю в целом составляют $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, а по отдельным моделям варьируют в пределах $3,9\text{--}8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для весеннего, летнего и осеннего сезонов увеличение по ансамблю ожидается на $3,7\text{--}4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по отдельным моделям на $2,3\text{--}5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 2).

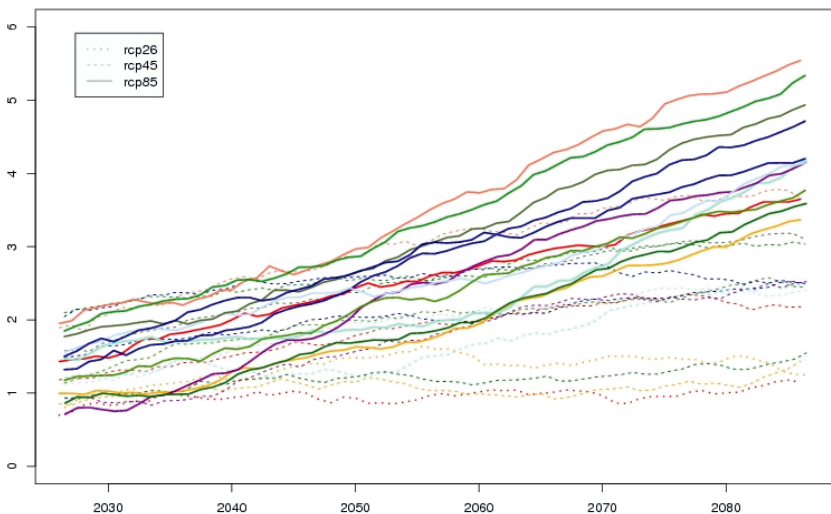


Рис. 1. Динамика годовых значений температуры воздуха на территории Беларуси по ансамблю моделей, $^{\circ}\text{C}$.

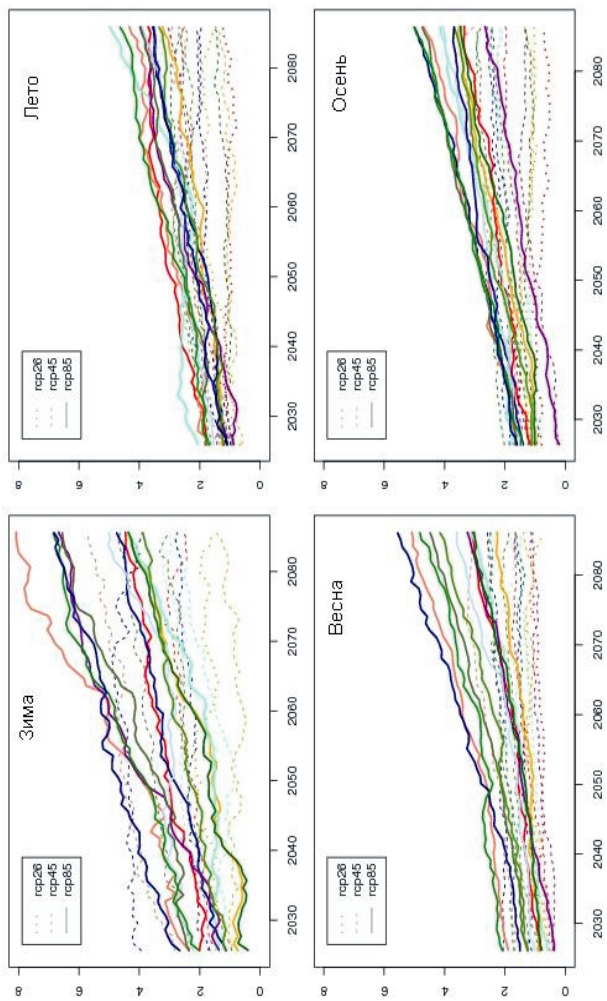


Рис. 2. Динамика сезонных значений температуры воздуха на территории Беларуси по ансамблю моделей, °С.

Для сценария RCP4.5 тенденция увеличения температуры воздуха сохраняется, но величина изменения колеблется в пределах 2,5 °C для годового значения, 3,0 °C для зимнего сезона, 2,4–2,5 °C для весеннего и осеннего и 1,7 °C для летнего сезонов. Для сценария RCP2.6 увеличение температуры ожидается от 0,7 °C для летнего до 1,6 °C для зимнего сезона. Величины этих изменений являются статистически значимыми при $P_{случ} < 5 \%$.

Изменения в режиме осадков характеризовались более дифференцированными величинами (рис. 3). При анализе не учитывались значения, составляющие менее 10 %, таким образом принимались во внимание только статистически значимые изменения.

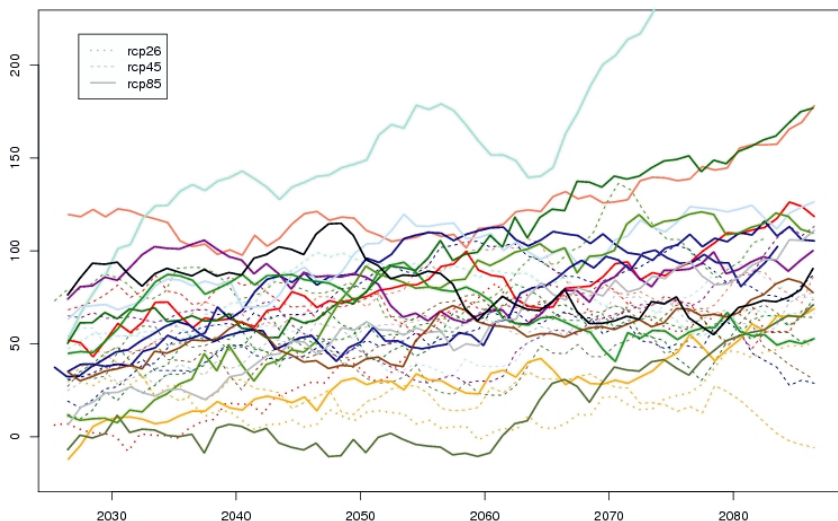


Рис. 3. Динамика годовых сумм осадков на территории Беларуси по ансамблю моделей, мм.

Как для температуры, так и для осадков наибольшие изменения прогнозируются для наиболее агрессивного сценария RCP8.5. Для годовой суммы осадков по ансамблю ожидается увеличение на 14 %. Для сумм зимнего сезона – 26 %, весеннего – 23 %, осеннего – 14 %. Для летнего сезона расчеты не являлись робастными, т. е.

по большинству моделей ожидается незначительное уменьшение осадков, но снижение не превышает 12 %. По отдельным моделям отмечается увеличение до 40 %.

Для сценария RCP4.5 увеличение годовой суммы по ансамблю ожидается незначительным, для зимнего и весеннего сезонов в пределах 14–15 %, для летнего сезона изменение незначительное, а для осеннего сезона по большинству моделей незначительное уменьшение (рис. 4).

Однако при этом треть моделей показала рост осадков в пределах 11–20 %. Для сценария RCP2.6 изменение осадков оказалось незначительным и робастным, только для зимнего сезона ожидается увеличение сезонных сумм на 13 %.

Анализ изменения производных климатических характеристик и индексов температуры воздуха показал, что ожидается рост количества дней с температурой выше 25 °C на 17 дней, с температурой выше 30 °C на 5 дней, но при этом не ожидается изменения повторяемости периодов с высокой температурой воздуха. В тоже время ожидается сокращение количества дней с максимальной температурой воздуха ниже 0 °C на 30 дней и смещение на более ранние сроки последнего дня с отрицательной температурой на 19 дней. Изменение этих характеристик закономерно сказывается на продолжительности вегетационного периода, который предположительно увеличится более чем на месяц к 2100 году.

Изменение характеристик осадков свидетельствует о том, что не ожидается значительных изменений в количестве дней с осадками различных градаций (0,1, 1 и 10 мм), а также повторяемости периодов с осадками заданной величины.

Но отмечается заметное увеличение количества дней с сильными осадками (более 20 мм/сут.). Для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 наибольшее увеличение прогнозируется в летний сезон на 1,5 и 3 дня соответственно. Для сценария RCP 8.5 значимое увеличение количества дней с сильными осадками ожидается также в зимний и весенний сезоны. (рис. 5).

То есть ожидаемый рост осадков на территории Беларуси вероятнее всего будет связан с увеличением дней (случаев) выпадения обильных осадков за короткий интервал времени.

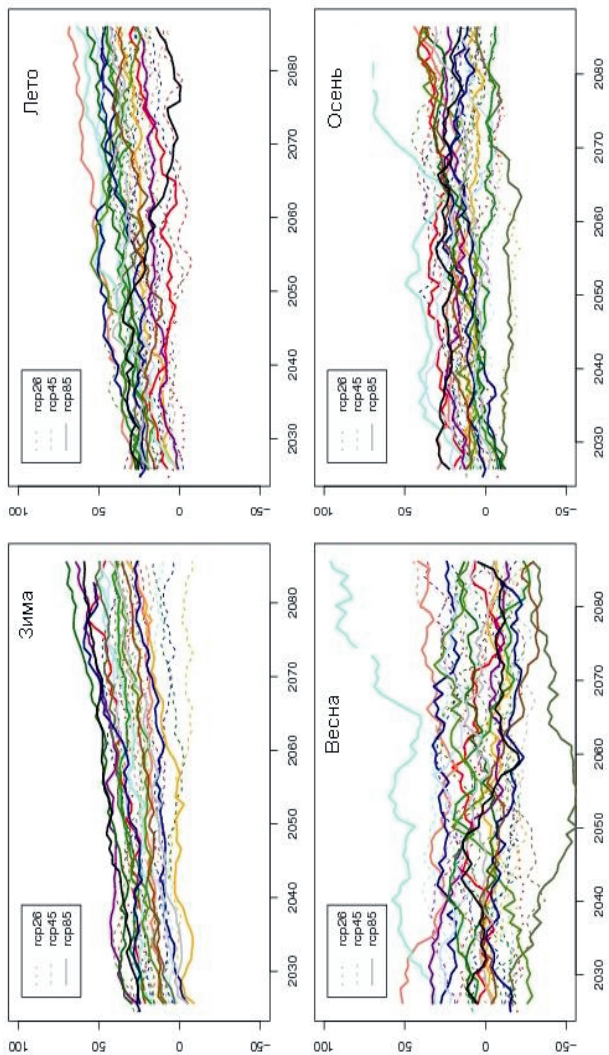


Рис. 4. Динамика сезонных сумм осадков на территории Беларуси по ансамблю моделей, мм.

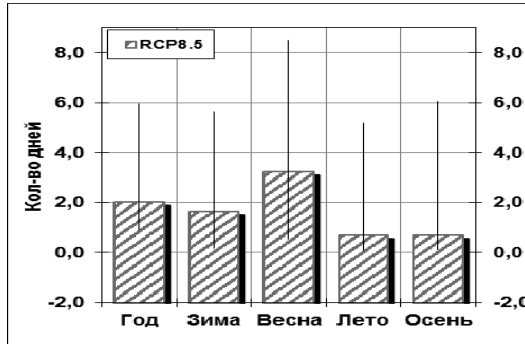
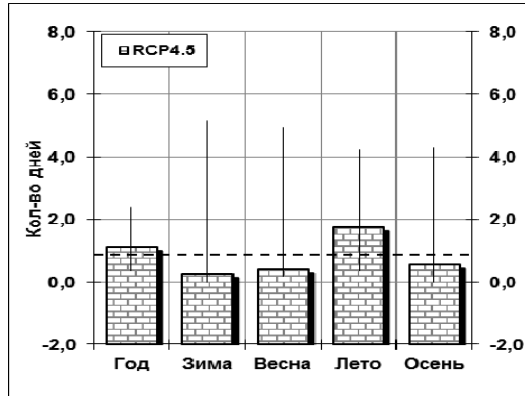


Рис. 5. Изменение количества дней с осадками (медиана), превышающими 20 мм в сутки за период 1971–2100 гг. по отношению к периоду 1970-2010 гг. (вертикальная линия показывает макс/мин значение, пунктирная линия обозначает уровень значимости при $R_{случ} < 5\%$).

Выводы

Выполненные расчеты показали наличие значимых изменений температуры воздуха и осадков на территории Беларуси, а также параметров и климатических индексов, зависящих от исследуемых метеорологических величин.

Прогнозируемые изменения связаны с положительными трендами температуры воздуха и осадков. Расчетные данные сезонных и годовых значений температуры воздуха и осадков варьируют в зависимости от комбинации глобальной и региональной моделей. Величина разброса в некоторых случаях оказывалась высокой, но направленность процессов оставалась согласованной по большинству моделей.

Величина изменения температуры воздуха и осадков в большинстве случаев зависела от сценария концентрации парниковых газов. Наименьшие величины изменения были характерны для наиболее благоприятного сценария с наименьшей концентрацией парниковых газов к 2100 г. – RCP2.6, наибольшие изменения – для наиболее агрессивного сценария RCP8.5.

Многолетние тренды основных метеорологических параметров подтверждают идентичные тенденции изменения климатических характеристик и индексов. Полученные расчетные значения температуры воздуха и осадков для территории Беларуси согласуются с результатами аналогичных исследований, выполняемых зарубежными учеными, в том числе российскими, и могут быть использованы при долгосрочных приближенных оценках климатических изменений в Беларуси.

Список использованных источников

1. *Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Школьник И.М.* Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России. Климат России в XXI веке. Часть 2 // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 8. – С. 5–19.

2. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 11. – С. 5–29.

3. *Кокорев В.А., Анисимов О.А.* Построение оптимизированной ансамблевой климатической проекции для оценки последствий изменений климата на территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2013. – Т. 25. – С. 131.

4. *Логонов В.Ф., Микуцкий В.С., Каждан Е.Н.* Использование моделей общей циркуляции для оценки климата в Беларуси // Природопользование. Вып. 6. – Минск, 2000. – С. 30–31.

5. *Frame D.J., Stone D.A.* Assessment of the first consensus prediction on climate change // *Nature Climate Change*. – 2012. – No. 3. – P. 357–359. – doi:10.1038/nclimate1763.

6. *Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A.M.G., Peterson T.* Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century // *Clim Res*. – 2002. – Vol. 19. – P. 193–212.

7. *Hewitt C.D., Griggs D.J.* Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts // *Eos*. – 2004. – No. 85. – P. 566.

8. *Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M., Braun A., Colette A., Déqué M. et al.* EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research // *Regional Environmental Change*. – 2014. – Vol. 14, Issue 2. – P. 563–578.

9. *Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., Vuuren D.P.P.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // *Climatic Change*. – 2011. – No. 1. – P. 213–241. – doi:10.1007/s10584-011-0156-z.

10. *Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Muecher C.A., Watkins J.W.* A climatic stratification of the environment of Europe // *Glob Ecol Biogeogr*. – 2005. – No. 14. – P. 549–563.

11. *Taylor K, Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull Am Meteorol Soc*. – 2012. – No. 93. – P. 485–498.

12. *Van der Linden P., Mitchell J.F.B. (eds).* ENSEMBLES: climate change and its impacts: summary of research and results from ENSEMBLES project. – Met Office Hadley Centre, Exeter, 2009.

Поступила в редакцию 08.10.2015 г.