

# Британско-Российский проект «Последствия изменений климата для России: изменения запасов и потоков углерода»

Целью совместного Британско-Российского проекта по изучению изменений климата, финансируемого Британским департаментом международного сотрудничества, являются улучшение понимания Великобританией и Россией науки об изменении климата, природных и экономических последствий этих изменений для обеих стран. На протяжении 3 лет усилия были направлены на привлечение внимания к этой проблеме посредством проведения научных исследований и мероприятий по ознакомлению общественности, в том числе лиц, принимающих политические решения, с их результатами.

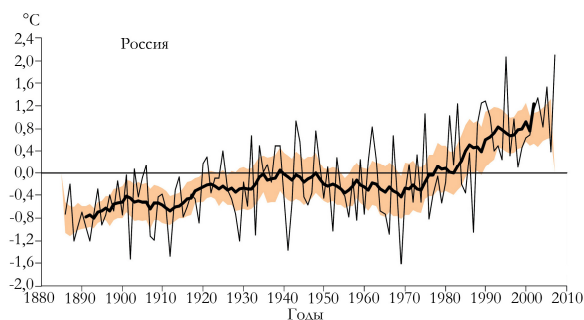
Данная брошюра содержит резюме обзора литературы по проблеме «Последствия изменений климата для России: изменения запасов и потоков углерода», подготовленного Российскими и Британскими участниками проекта; в полном виде обзор доступен на веб-странице проекта ([www.uk-russia-ccproject.info](http://www.uk-russia-ccproject.info)).

## Введение

Территория России охватывает более одной восьмой части суши, занимая значительные пространства в Северной Европе и Азии. Прогнозируемые на этой территории изменения климата превосходят изменения, ожидаемые в других регионах (IPCC, 2007). Глобальное потепление окажет влияние на наземные экосистемы, от тундры и таежных лесов на севере до степей и лугов на юге. Прогнозируется таяние вечной мерзлоты, расширение зоны распространения лесов к северу и в горные области и их одновременное сокращение с юга из-за ряда факторов, таких как опустынивания, учащения лесных пожаров и расширения сельскохозяйственного землепользования. Эти изменения могут оказывать влияние на глобальный климат, воздействуя на энергетический, водный и углеродный баланс. В целом, наземные экосистемы являются важным регулятором глобального климата, роль которого еще недостаточно полно изучена.

## Современные тенденции изменения климата России

На протяжении 20-го века произошли отчетливые изменения температуры воздуха, ее сезонного цикла, частоте и распределении температурных экстремумов. На территории России эти изменения были, как правило, выше, чем глобальные. В период с 1907 по 2006 год среднегодовая температура повысилась примерно на  $1,3^{\circ}\text{C}$ , что более чем в 1,5 раза превышает глобальное потепление, составившее за этот же период приблизительно  $0,7^{\circ}\text{C}$ . Особенно сильным был рост температуры в последнее десятилетие (Мелешко, 2008). В наименьшей степени потепление затронуло Северо-восток России, где среднегодовая температура увеличилась на  $0,5^{\circ}\text{C}$  за столетие. Наибольшим оно было в Западной Сибири и в Прибайкалье ( $1,5 - 1,7^{\circ}\text{C}$  за столетие). Увеличение температуры зимнего периода значительно превышало ее рост летом, в среднем по России составив  $1,7^{\circ}\text{C}$  и  $0,6^{\circ}\text{C}$  за столетие. В последние 30 лет увеличение годовых минимумов температуры опережало рост годовых максимумов (в среднем по стране  $0,8^{\circ}\text{C}$  и  $0,6^{\circ}\text{C}$  за десятилетие). В отдельных районах годовые минимумы увеличивались со скоростью до  $2,6^{\circ}\text{C}$  за десятилетие (Мелешко, 2008).



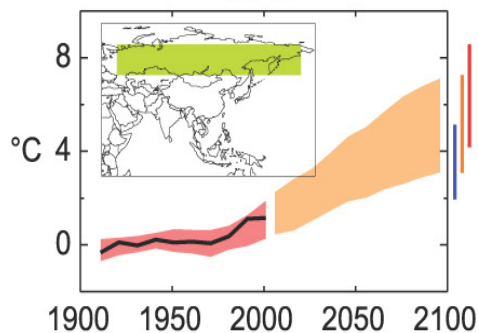
**Рис. 1:** Изменения среднегодовой приземной температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$  в отклонениях от средней за период 1961-1990), осредненные по территории России. Тонкая линия — ежегодные данные. Толстая линия — скользящее 11-ти летнее осреднение (Мелешко, 2008, исправленный).

Тренды осадков оценить значительно труднее, прежде всего из-за их сильной изменчивости и недостаточно однородной и густой сети наблюдений. Согласно некоторым исследованиям, суммы годовых и сезонных осадков по всей России имеют тенденцию к уменьшению в течение последних 50 лет, причем наиболее выраженное снижение происходит в северо-восточной части страны. Слабая тенденция к увеличению осадков наблюдалась на Европейской части России. Тенденции изменения твердых осадков и высоты снега также неопределенны, но в основном показывают рост, особенно в северной части центральной Евразии.

Эти наблюдения в России вписываются в общемировую картину изменений, согласно которой климат становится более теплым и влажным с большим количеством экстремальных осадков в некоторых местах при увеличении частоты и/или продолжительности засух в других.

## Прогнозы климата

Большинство моделей климата воспроизводят наблюдаемые изменения среднегодовой температуры воздуха в России, но, как правило, занижают ее абсолютную величину и межгодовую изменчивость. При этом модели завышают тренды осадков в большинстве регионов. Глобальные климатические модели, отобранные для Четвертого оценочного отчета Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) предсказывают ускорение потепления по сравнению с имевшим место в прошлом веке (IPCC, 2007).



**Рис 2:** Аномалии температуры воздуха по отношению к периоду 1901-1950 для северной Азии (зеленый прямоугольник показывает регион осреднения). Черная кривая – данные наблюдений за период 1906–2005; расчеты по мультимодельному ансамблю с учетом всех известных действующих факторов в прошедший период (красная полоса) и прогноз на 2001-2100 по сценарию эмиссии парниковых газов A1B (оранжевая полоса). Отрезки справа обозначают диапазон прогнозируемых изменений температуры для десятилетия 2091-2100 для сценариев B1 (голубой), A1B (оранжевый) и A2 (красный). (IPCC (2007, Рис.11.8).

Прогнозируемое потепление будет выше зимой, чем летом. Наибольшим оно ожидается в континентальных районах и на крайнем севере России. Модели предсказывают больший рост осадков в высоких широтах, чем в среднем по Земле. Прогнозируемые изменения осадков в Арктике имеют выраженную сезонность с относительно сильным увеличением зимой и осенью, и слабым летом.

Результаты мультимодельных ансамблевых расчетов МГЭИК согласованно указывают на увеличение как годовой температуры, так и суммы осадков к концу 21 века в среднем по ансамблю моделей на 4,3 °C и 15%, соответственно (IPCC, 2007). Однако есть значительные неопределенности в оценке даже направления изменения осадков в летние месяцы. Большинство климатических моделей предсказывают увеличение летней засушливости по крайней мере в некоторых районах северной Евразии, большую продолжительность засух и меньшее количество дней с осадками с увеличением доли ливневых осадков. При этом прогнозы ливневых осадков связаны с большой неопределенностью, поскольку модели климата не вполне надежно воспроизводят экстремальные явления.

### Изменения вечной мерзлоты

Таяние вечной мерзлоты и последующее высвобождение углерода может оказать воздействие на глобальный климат (Schuur и др., 2008). Вечная мерзлота распространена более чем на 60% территории России и, по существующим оценкам, весьма чувствительна к глобальному потеплению. В исследованиях как регионального, так и циркумполярного масштабов, при помощи моделей различной сложности были получены прогнозы воздействия потепления климата на вечную мерзлоту в 21-м веке. Они указывают на повышение температуры грунта, увеличение мощности сезонно-талого слоя и сокращение площади распространения вечной мерзлоты в верхнем слое вблизи поверхности при том, что в более глубоких слоях многолетнемерзлые породы могут сохраняться в реликтовой форме длительное

время. Вместе с тем, отклик вечной мерзлоты на потепления климата, вероятно, будет более сложным, чем предсказывают некоторые упрощенные модели. В значительной степени он будет зависеть от растительности, и важным регулятором предстоящих изменений в ближайшие несколько десятилетий будет меняющееся соотношение между низшими формами (мхи, лишайники), с одной стороны, и расширением ареала распространения кустарничковых и древесных видов, с другой.

В результате масштабной деградации вечной мерзлоты произойдет вовлечение оттаивающих органических отложений в углеродный цикл, что будет способствовать увеличению эмиссии парниковых газов в атмосферу и может привести к усилению глобального потепления. Этому же будут способствовать сопутствующие геоморфологические процессы, такие как термокарст и эрозия, приводящие к обнажению достаточно глубоких отложения органики (Schuur и др., 2008). Большие неопределенности связаны с оценкой запасов углерода в многолетнемерзлых грунтах. От их величины, в конечном счете, зависит потенциальное воздействие названного механизма на глобальный климат. Последние данные свидетельствуют о том, что многолетнемерзлые грунты вместе с сезонно-талым слоем в циркумполярной зоне содержат до 1850 гигатонн углерода, в том числе почти 300 Гт в виде торфа (McGuire и др., 2009; Tarnocai и др., 2009, и др. Zimov и др., 2006). Это почти вдвое больше, чем содержится во всей атмосфере.

Эмиссия углерода при таянии вечной мерзлоты может осуществляться в форме двуокси углерода (CO<sub>2</sub>) или, при анаэробных условиях, в форме метана (CH<sub>4</sub>). В болотах углерод высвобождается преимущественно в форме метана. Болота и переувлажненные земли бореальной зоны, являясь источником метана, в то же время являются стоком для атмосферного CO<sub>2</sub>. Метан оказывает приблизительно в 20 раз более сильное парниковое воздействие, чем эквивалентное количество CO<sub>2</sub>, при том, что среднее время жизни каждой его молекулы в атмосфере только 12 лет. Модельные расчеты показывают, что к середине 21-го века эмиссия метана из болот криолитозоны России может возрасти на 25% -30% или на 6-10 Мт в год (Anisimov and Reneva, 2006). Такое увеличение эмиссии, согласно полученным оценкам, не окажет заметного воздействия на глобальный климат (Anisimov, 2007). Необходимо принимать во внимание, что полученные оценки не учитывают изменения гидрологических условий почвы. В торфяниках баланс между накоплением и эмиссией углерода зависит от уровня грунтовых вод. Понижение уровня, будь тому причиной таяние вечной мерзлоты, изменение климата или деятельность человека, приведет к увеличению доли торфа в верхней аэрируемой зоне. Это вызовет усиление аэробного разложения и эмиссии CO<sub>2</sub> и сокращение производства метана. Рост осадков может поднять уровень грунтовых вод, в результате чего увеличится анаэробная область и усилится эмиссия метана. Таким образом эмиссия CH<sub>4</sub> зависит от комбинации климатических и гидрологических условий.

## Изменения в природных экосистемах

Около половины территории Российской Федерации занято лесом, и есть свидетельства того, что бореальные леса уже начали реагировать на изменения климата в последние десятилетия. Прогнозируемые последствия изменения климата включают перемещение границы леса к северу и выше в горы, изменения состава и продуктивности лесов наряду с сокращением и гибелью некоторых видов деревьев из-за ухудшения влагообеспеченности в более теплых условиях, увеличение нашествия насекомых-вредителей и учащения пожаров. Эти изменения влияют на альбедо поверхности, шероховатость и энергетический баланс, а также на потоки влаги и углеродный цикл, что может привести к воздействию на глобальный климат. В некоторых исследованиях прогнозируются масштабные изменения растительности в Сибири к концу 21-го века, характеризующиеся почти полным исчезновением тундры, смещением к северу таежной зоны, а также расширением степных, полупустынных и пустынных районов за счет бореальных лесов. Однако лишь немногие из этих исследований учитывают реальные темпы сукцессии растительности и миграции границы лесов. По этой причине некоторые авторы полагают, что прогнозируемое расширение на север зоны тайги едва ли будет завершено к концу этого века. Это означает, что изменения бореальных лесов могут продолжаться и после стабилизации климата на протяжении десятилетий. Согласно концепции "неизбежных изменений", развитие природных экосистем, таких как тундра и северные леса, может быть предопределено задолго до того, как эти изменения станут заметны. По этой причине экосистемы могут продолжать изменяться на протяжении многих десятилетий после стабилизации климата (Jones и др., 2009).

Растительности и почвы лесных экосистем Сибири содержат значительные запасы углерода. Кроме того, бореальные леса являются значительным стоком атмосферного CO<sub>2</sub>, величина которого плохо изучена. Некоторые авторы полагают, что в своем нынешнем состоянии бореальные леса России обладают ограниченной способностью поглощать углерод и лишь частично компенсируют его антропогенные выбросы. Есть даже признаки того, что с учетом лесных пожаров и эмиссии метана с переувлажненных территорий, область к северу от 50 ° северной широты в настоящее время в целом может являться нетто-источником углерода. В то же время существуют значительные неопределенности в оценках годового объема выбросов углерода в связи с лесными пожарами, и их воздействие на климат в длительной перспективе остается неясным. Расчеты по метеорологическим данным указывают на статистически значимое увеличение пожароопасности на протяжении 20-го века в Сибири и на Дальнем Востоке России, но спутниковые данные не подтверждают рост частоты пожаров в Сибири в последние годы. В 21-м веке прогнозируется повышение частоты пожаров и удлинение пожароопасного периода, хотя некоторые исследования показали снижение частоты пожаров в ряде регионов в связи с увеличением осадков и увлажнения. До сих пор остается неясным, приведут ли все указанные процессы к усилению роли лесных экосистем

высоких широт как поглотителя, или же источника CO<sub>2</sub>.

## Изменения сельскохозяйственных экосистем

Коммерческое сельскохозяйственное производство в России сосредоточено на юге Европейской территории. Эти районы характеризуются высокой межгодовой изменчивостью климата и регулярными засухами. Принято считать, что теплые и влажные условия в ближайшие десятилетия в сочетании с ростом CO<sub>2</sub> будут выгодны для сельского хозяйства в высоких широтах. На севере Европы высока вероятность расширения территории, пригодной для сельскохозяйственной деятельности, а также увеличения продуктивности культур в традиционных районах земледелия. С учетом удлинения вегетационного периода и улучшения в целом агроклиматических условий можно ожидать увеличения сельскохозяйственного потенциала Российской Федерации. Вместе с тем ряд детальных исследований указывают на то, что изменение климата не приведет к кардинальному улучшению условий сельскохозяйственного производства (Alcamo et al, 2007, Dronin & Kirilenko, 2008). Расширение сельского хозяйства в бореальную зону может в действительности оказаться сложной задачей, поскольку вегетационный период там непродолжителен и во многих районах почвы бедны питательными веществами, закислены и непригодны для ведения сельского хозяйства. В более продуктивных южных районах может сильно сказываться неблагоприятное воздействие высоких температур, проявляющееся в снижении урожайности, увеличении ее изменчивости и в сокращении площадей, пригодных для выращивания традиционных культур. Это имеет серьезные последствия для продовольственной безопасности страны. Негативное воздействие высоких температур на продуктивность сельского хозяйства может быть усилено за счет изменения частоты экстремальных погодных явлений. Даже если в среднем изменения продукции растениеводства малы, прогнозируемое увеличение волн тепла и учащение засух может к 2020-м годам удвоить риск уменьшения и потери урожая в основных районах земледелия, а к 2070-м годам - утроить (Alcamo et al., 2007).

Некоторые исследования выявили возможности сокращения потерь почвенного углерода и тем самым уменьшения будущих изменений климата за счет изменения технологии сельскохозяйственного производства (Smith et al, 2007b, Smith et al, 2007e). По результатам глобального анализа, из 22-х исследованных регионов Россия находится на 6 месте по потенциалу снижения воздействия на климат сельскохозяйственного производства. При этом изменение климата также может влиять на эффективность мер по смягчению последствий в сельскохозяйственном секторе (Falloon et al 2009; Falloon & Betts 2009). Ключевыми будут оставаться те факторы, которые контролируют цикл углерода и связанные с ним потоки парниковых газов. Для почвенного углерода главным является баланс между тем, как изменения количества осадков, температуры и концентрации CO<sub>2</sub> повлияют на продуктивность растительности, а следовательно на накопление углерода в почве, с одной стороны, и как изменения влажности почвы (и температуры) повлияют на разложение почвенного углерода, с другой.

## Выводы

Опубликованные в научной литературе результаты указывают на значительные изменения природных и сельскохозяйственных экосистем России как следствие изменения климата. Изменениям вечной мерзлоты отводилась важная роль в воздействии на глобальный климат, поскольку она содержит значительные запасы углерода, в частности в мерзлых болотах. Однако результаты моделирования показали, что этот механизм, скорее всего, не окажет существенного воздействия на величину и скорость потепления.

В долгосрочной перспективе более теплый климат будет способствовать росту деревьев и кустарников, что приведет к расширению бореальных лесов и вытеснению ими тундры. Миграция границы лесов в Арктике может отставать от изменения климата на несколько десятилетий, если не столетий. За счет различных природных и антропогенных факторов может происходить отступление границы лесов с юга. Более жаркие и засушливые условия вегетационного периода в сочетании с учащением засух могут оказать

негативное воздействие на сельскохозяйственное производство в некоторых районах с развитым сельскохозяйственным производством.

В совокупности, эти изменения повлияют на динамику углерода на территории России. Имеются значительные неопределенности в оценках углерода, содержащегося в почвах и лесах на территории России. Таяние вечной мерзлоты и сокращение лесов может способствовать отрицательному балансу углерода. В настоящее время в циркумполярной субарктической области баланс углерода в форме CO<sub>2</sub> близок к нулевому. Вместе с тем, эти районы вносят вклад в парниковый эффект за счет эмиссии метана. Это относится даже к тундре, которая является нетто-стоком углерода (IPCC, 2007).

Сельское хозяйство может сыграть важную роль в смягчении последствий изменения климата главным образом за счет сокращения выбросов углерода и увеличения его накопления в почвах. Исследования указывают на то, что Россия обладает большим потенциалом для реализации такого механизма.

### Основные публикации

1. Alcamo, J., N. Dronin, M. Endejan, G. Golubev, and A. Kirilenko (2007): A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia. *Global Environ. Change*, 17, 429–444, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.12.006.
2. Anisimov, O.A. (2007): Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission. *Environ. Res. Lett.*, 2, 045016, doi:10.1088/1748-9326/2/4/045016.
3. Anisimov, O.A., and S.A. Reneva (2006): Permafrost and changing climate: the Russian perspective. *Ambio*, 35(4), 169–175.
4. Dronin, N., and A. Kirilenko (2008): Climate change and food stress in Russia: what if the market transforms as it did during the past century? *Climatic Change*, 86:123–150, doi:10.1007/s10584-007-9282-z.
5. IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
6. Jones, C., J. Lowe, S. Liddicoat, and R. Betts (2009): Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nature Geoscience*, 2, 484–487, doi:10.1038/ngeo555.
7. McGuire, A.D., Anderson, L.G., Christensen, T.R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D.J., Heimann, M., Lorenson, T.D., Macdonald, R.W., and Roulet, N. 2009. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change. *Ecological Monographs* 79 (4): 523–555.
8. Meleshko, V.P. (Ed.) (2008): *Assessment Report on Climate Change and its Consequences in Russian Federation*. Moscow: Roshydromet (in Russian).
9. Schuur, E.A.G., J. Bockheim, J.G. Canadell, E. Euskirchen, C.B. Field, S.V. Goryachkin, S. Hagemann, P. Kuhry, P.M. Lafleur, H. Lee, G. Mazhitova, F.E. Nelson, A. Rinke, V. E. Romanovsky, N. Shiklomanov, C. Tarnocai, S. Venevsky, J.G. Vogel, and S.A. Zimov (2008): Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle. *BioScience* 58(8), 701–714, doi:10.1641/B580807.
10. Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H.H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, R.J. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenko, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach, and J.U. Smith (2007a): Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363, 789–813, doi:10.1098/rstb.2007.2184.
11. Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, B. Scholes, O. Sirotenko (2007b): Agriculture. In B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Eds): *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Chapter 8, Cambridge: Cambridge University Press.
12. Tarnocai, C., J.G. Canadell, E.A.G. Schuur, P. Kuhry, G. Mazhitova, and S. Zimov (2009): Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochem. Cycles*, 23, GB2023, doi:10.1029/2008GB003327.
13. Zimov, S.A., E.A.G. Schuur, and F.S. Chapin III (2006): Permafrost and the Global Carbon Budget. *Science*, 312, 1612–1613, doi:10.1126/science.1128908.

### Контакты:

#### В России:

Проф. Олег Анисимов  
Государственный  
гидрологический институт,  
Вторая Линия В.О., 23  
199053 С.Петербург  
Тел.: +7 812 323-33-43  
Fax: +7 812 323-10-28  
E-mail:  
[oleg@oa7661.spb.edu](mailto:oleg@oa7661.spb.edu)

#### In UK:

Dr. Rutger Dankers  
Meteorological Office Hadley  
Centre  
FitzRoy Road Exeter Devon  
EX1 3PB United Kingdom  
Tel: +44 (0)1392 886212  
Fax: +44 (0)1392 885681  
Email:  
[rutger.dankers@metoffice.gov.uk](mailto:rutger.dankers@metoffice.gov.uk)

