

ИЗМЕНЕНИЯ ЦИКЛОГЕНЕЗА НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ В 1976-2017 гг.

В.П. Горбатенко^{1)}, Е.Л. Тунаев²⁾, К.Н. Пустовалов¹⁾, М.А. Волкова¹⁾,
О.Е. Нечепуренко¹⁾*

¹⁾Национальный исследовательский Томский государственный университет,
РФ, 634050, Томск, пр. Ленина, 36;
* адрес для переписки: vpgor@tpu.ru

²⁾Западно-Сибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,
РФ, 630099, Новосибирск, ул. Советская, 30

Реферат. Одним из эффектов современного глобального потепления является изменение частоты и/или интенсивности внетропических циклонов. Западная Сибирь является территорией активной циклонической деятельности. Одной из особенностей региона является повышенный циклогенез в междуречье Обь-Иртыш (50-64°с.ш., 60-90°в.д.), в котором расположен уникальный природный объект – Большое Васюганское Болото (БВБ). Над этой территорией образуется около 20% всех циклонов, определяющих погоду региона. В работе представлены особенности пространственного расположения циклонов, образовавшихся над территорией Западной Сибири и совокупность их характеристик за период 1976-2017 гг. При анализе изучались: синоптические условия образования, повторяемость образования в различные периоды года, продолжительность «жизни», давление в центре, внутренняя энергия и энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды, а также внутригодовой ход и межгодовой ход этих характеристик. Получено, что чаще всего местные циклоны формируются на волнах имеющихся фронтальных систем. В 52% случаев это одиночные волновые циклоны, в 22% – серии волновых циклонов. Это наиболее глубокие и одни из самых развитых по вертикали местные циклоны. Циклоны, образующиеся на приземных (вторичных) фронтах образуются в 13% случаев, и столько же в ложбине основной барической депрессии. Во внутригодовом ходе повышенное число и наибольшая продолжительность «жизни» местных циклонов приходится на теплый период года. Максимум процессов генерации циклонов отмечается в августе (в среднем 5 циклонов с продолжительностью «жизни» более 5 дней), когда подстилающая поверхность прогревается особенно сильно. В этот же месяц наблюдается наименьшее давление в центрах циклонов.

Детально описан температурный режим региона. Обнаружены заметные изменения некоторых из этих характеристик в 2008-2017 гг. по сравнению с предыдущим периодом. Выдвинуты предположения о причинах обнаруженных изменений – обратное воздействие БВБ, меняющегося вследствие глобального потепления, на формирование местного климата, в том числе на температурно-влажностный режим и циклогенез. Один из факторов такого обратного влияния – усиление эмиссии метана.

Ключевые слова. Междуречье Обь-Иртыш, местные циклоны, температурно-влажностный режим, Большое Васюганское болото, обратная связь, метан.

Введение

В 2019 г. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) выпустила доклад с кратким названием «Изменение климата и суша» (IPCC, 2019). В главе 2 «Взаимодействия суши и атмосферы» (Land-climate interactions) особенно подчеркивается роль обратной связи между подстилающей поверхностью и состоянием атмосферы, а, значит, и климатом.

В данной работе рассматривается регион Западной Сибири, а детально – междуречье Обь-Иртыш, в котором расположен уникальный природный объект – Большое Васюганское Болото (БВБ). Местные свойства земной поверхности, газообмен с атмосферой, способствующий ее обогащению водяным паром и метаном, чувствительность этих процессов к глобальному потеплению делают региональную климатическую систему особенно привлекательной и ключевой для исследования. В том числе весьма важным представляется исследование местного циклогенеза, поскольку значительная часть циклонов, развивающихся в Западной Сибири, формируется в междуречье Обь-Иртыш.

Цели этой работы:

- анализ характеристик местных циклонов, развивающихся в междуречье Обь-Иртыш, исходя из данных мониторинга климата;
- изучение тенденций их изменения с 1976 по 2017 гг.;
- обсуждение возможных причин наблюдаемых изменений.

Методы и материалы

Настоящее исследование основано на данных о циклонах в районе междуречья Обь-Иртыш за период 1976-2017 гг. В качестве местных циклонов рассматривалась область пониженного давления при наличии хотя бы одной замкнутой изобары с характерной циркуляцией и структурой метеорологических полей. Учитывались только те барические образования, которые прослеживались на кольцевых картах погоды не менее четырех соседних сроков, а на приземных синоптических картах – не менее двух сроков. Для этого использовались кольцевые карты погоды и карты барической топографии фонда ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС».

Территория исследования ограничена географическими координатами 50-64°с.ш., 60-90°в.д. Для оценки различий в энергетических характеристиках циклонов, зародившихся непосредственно над болотами и вне их, вся территория исследований была разделена на три части: болотистый север территории (60-64°с.ш., 60-90°в.д.); центральные районы, где расположено Большое Васюганское болото (54-60°с.ш., 60-90°в.д.) и юг, где болотные системы отсутствуют (50-54°с.ш., 60-90°в.д.).

В зависимости от синоптических условий формирования выявленные местные циклоны были разделены на следующие виды: одиночные волновые, серии волновых, прослеживающиеся только на приземных фронтах, малоподвижные циклоны и сформировавшиеся в барической ложбине основного циклона.

В ходе исследования анализировались повторяемость образования циклонов в различные периоды года (теплый период: июнь-август; холодный период: ноябрь-март; переходный период: апрель-май и сентябрь-октябрь), продолжительность жизни, траектории смещения, степень вертикального развития, давление в центре, а также внутригодовой ход и динамика этих характеристик в 1976-2017 гг.

В работе также изучены энергетические характеристики циклонов. *Внутренняя энергия* определяется кинетической энергией движения молекул и является функцией температуры, при этом атмосфера по своим свойствам принимается близкой к идеальному газу:

$$I = \frac{C_v}{g} \int_P^{P_0} T dp. \quad (1)$$

Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды представляет собой суммарный эффект при процессах конденсации водяного пара и испарения облачных частиц и частиц осадков в заданном объеме воздуха:

$$Ec = \frac{L}{g} \int_P^{P_0} W dp. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $g=9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, C_v – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме (Дж/кг К), T – температура воздуха (К), P – давление воздуха (гПа), W – массовая доля водяного пара (г/кг), $L=2.49 \times 10^6$ Дж/кг – скрытая теплота парообразования.

При оценке энергетических запасов атмосферы в слое от поверхности земли до уровня АТ–200 были использованы данные аэрологического зондирования за 2008-2017 гг. на 22 станциях, расположенных на территории России, и 4 – на территории Казахстана. Расчет внутренней энергии и энергии фазовых переходов, отнесенных к единице массы, проводился на основе методики (Калинин, 2009). Всего были изучены энергетические характеристики 60 циклонов, сформировавшихся над исследуемой территорией между речья Обь-Иртыш в разные сезоны года.

Расчет I и Ec проводился для слоев, ограниченных стандартными изобарическими поверхностями от поверхности Земли до уровня 200 гПа, затем результаты расчета были отнесены к единице площади. Данные аэрологического зондирования для расчета взяты для станции, которая попадала в область влияния циклона. Рассчитанные значения линейно интерполировались в центр барического образования (местного циклона).

Оценка долговременных тенденций температурного режима проводилась на основе наблюдений за приземной температурой воздуха (Всероссийский научно-исследовательский институт..., <http://meteo.ru/date>) на длиннорядных станциях Томской области за период 1887-2017 гг, в рамках указанного временного диапазона были рассмотрены периоды: 1973-2017 гг. (для сравнения со справочными данными Научно-прикладного справочника по климату СССР), и 2008-2017 гг. (последнее десятилетие исследуемого периода).

Для изучения пространственных особенностей изменения средней температуры воздуха за летние месяцы периода 1990-2019 гг. использовался реанализ ERA, который является пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений, созданным Европейским центром среднесрочных прогнозов (ECMWF). Применение данных ERA5 обусловлено рядом достоинств: непрерывными рядами данных за период более 40 лет (с 1979 г. по настоящее время), высоким пространственным ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) и временным (1 час) разрешением (Copernicus Climate Change Service..., <https://cds.climate.copernicus.eu/>), а также высокой точностью описания температурного режима. По оценке авторов работы (Платонов, Новикова, 2019) средняя ошибка значений температуры воздуха в ERA5 составляет 0.8°C , а среднеквадратическое отклонение (σ) не превышает 2.5°C .

Методами исследования в данной работе являются синоптический анализ, статистический анализ метеорологических рядов и географический анализ пространственной локализации анализируемых объектов. Обработка данных осуществлялась с помощью пакетов прикладных программ (Statistica, Excel) стандартными методами математической статистики. Статистическая значимость выявленных тенденций оценивалась с применением критерия Стьюдента (при 5%-ном уровне значимости).

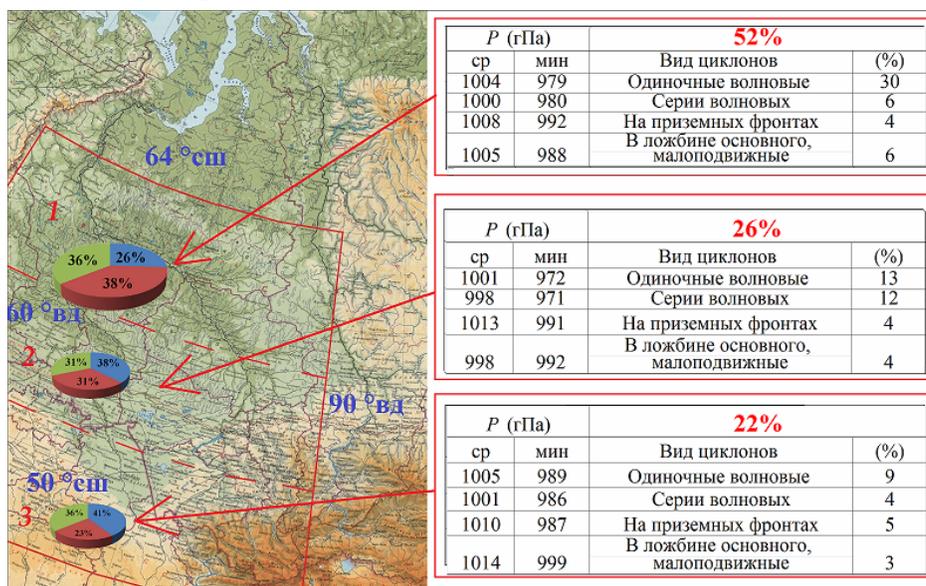
Результаты

Местные циклоны, как правило, представляют мезомасштабные барические образования с радиусом 300-500 км, в отдельных случаях развиваясь до объектов синоптического масштаба с радиусом более 1000 км, и, таким образом, эволюционируя в основной циклон. При этом в подавляющем большинстве случаев происходит образование новых циклонов, а регенерация старых (заполняющихся) циклонов отмечается крайне редко (менее 1%). Продолжительность жизни таких циклонов составляет от 1 до 6 дней.

Рис. 1 демонстрирует пространственное распределение местных циклонов по району исследования. Приведены годовой ход, их повторяемость по видам в соответствии с синоптическими условиями формирования (% от общего числа всех местных циклонов) и их интенсивность (среднее и минимальное давление в центрах). Установлено, что 52% местных циклонов образовались на севере территории ($60-64^\circ\text{с.ш.}$, $60-90^\circ\text{в.д.}$) с максимальной повторяемостью (38%) в теплый период. В центральных районах, где расположено Большое Васюганское болото ($54-60^\circ\text{с.ш.}$, $60-90^\circ\text{в.д.}$), сформировалось 26% циклонов. Заметим, что самые глубокие циклоны развиваются именно в цен-

тральных районах исследуемой территории. Наименьшая повторяемость (22%) отмечается на юге, где болотные системы отсутствуют (50-54°с.ш., 60-90°в.д.). При этом в центральной и южной частях территории максимум повторяемости циклонов смещен на холодный период года. С увеличением географической широты число циклонов, образующихся в теплый период года, увеличивается, а в холодный уменьшается в соответствии с изменчивостью положения ПВФЗ.

Следует отметить, что чаще всего местные циклоны формируются на волнах имеющихся фронтальных систем: 52% всех случаев представляют одиночные волновые циклоны и 22% – серии волновых циклонов. Это наиболее глубокие и одни из самых развитых по вертикали местных циклонов. Циклоны, образующиеся на приземных (вторичных) фронтах образуются в 13% случаев, а в ложбине основной барической депрессии и малоподвижные циклоны – суммарно составляют 13%.



■ 1 Холодный период ■ 2 Теплый период ■ 3 Переходные сезоны

Рисунок 1. Характеристики местных циклонов в зависимости от района образования

Figure 1. The characteristics of local cyclones depending on generation area

Циклоны, сформировавшиеся в междуречье Обь-Иртыш, проходят значительные расстояния, распространяют свое влияние на территорию Западной Сибири, Алтай и центральные и северные районы Красноярского края. При этом циклоны, образующиеся в ложбине основной барической депрессии, преимущественно над северными районами, как правило, смещаются на север, оказывая влияние на районы Обской Губы и полуострова Ямал, либо остаются малоподвижными, формируя погоду над районом образования.

Анализ долговременной изменчивости циклонической активности показал значительное увеличение числа местных циклонов после 2008 г. (рис. 2) и суммарной продолжительности их жизни. При этом циклоны становились все более

глубокими и высокими, начиная с середины 1990-х годов, а межгодовой ход давления в центрах циклонов отражает тенденцию к уменьшению (рис. 3а). Средние значения давления в центрах циклонов за 40 анализируемых лет уменьшилось почти на 10 гПа, причем в последнее десятилетие падение средних значений давления в местных циклонах менее вариативно.

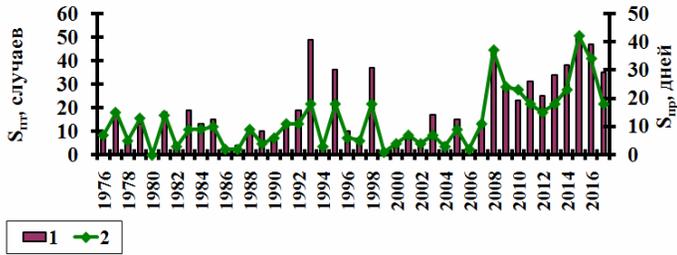


Рисунок 2. Суммарная продолжительность (1) местных циклонов за год S_{np} (дни) и их повторяемость (2) S_{nm} (число в год)

Figure 2. Total duration of local cyclones (1) per year S_{np} (days) and their repeatability (2) S_{nm} (number per year)

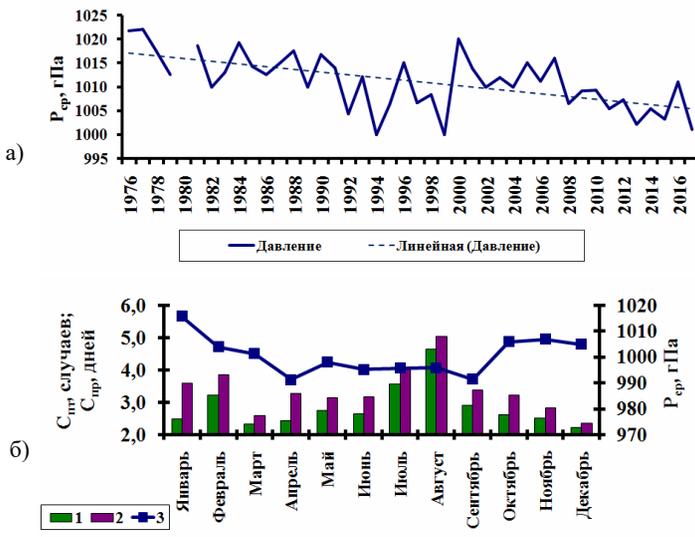


Рисунок 3. На панели а) представлено среднее значение давления P_c . На панели б) для местных циклонов представлено распределение по месяцам повторяемости C_{nm} (1), продолжительности «жизни» C_{nm} (2) и давления P_c в центре (3)

Figure 3. Graph a) shows the average pressure P_c . Graph б) presents frequency of the occurrence of local cyclones C_{nm} by months (1), the life time C_{nm} (2) and pressure P_c in the center (3)

Во внутригодовом распределении (рис. 3б) повышенное число и наибольшая продолжительность «жизни» местных циклонов приходится, в основном, на теплый период, а максимум процессов генерации циклонов отмечается в августе (в среднем, 5 циклонов с продолжительностью «жизни» более 5 дней), когда подстилающая поверхность прогревается особенно сильно. В

этот же период наблюдается наименьшее давление в центрах циклонов, причем среднее давление в циклонах, образовавшихся в августе за последнее десятилетие, уменьшилось примерно на 4 гПа.

Особенностью последнего десятилетия является особенно заметное увеличение числа циклонов, сформировавшихся на юге Западной Сибири (50-54°с.ш., 60-90°в.д.) в холодную часть года, а в центральных районах (54-60°с.ш., 60-90°в.д.) – в теплую часть года.

В холодный период года в атмосфере Западной Сибири часто формируются блокирующие процессы и местные циклоны, которые, как правило, образуются на относительно повышенном региональном фоне давления. Замечено некоторое увеличение числа местных циклонов во вторую половину зимы (январь-февраль).

Циклоны, образовавшиеся в разных частях исследуемого региона – между речья Обь-Иртыш – обладают разными запасами внутренней энергии и энергии фазовых переходов.

Наиболее глубокие циклоны формировались в центральной части рассматриваемого региона, где расположено Большое Васюганское болото. Считается, что площадь Васюганского болота составляет от 53 до 55 тысяч км², в 1.7 раза больше площади о. Байкал. Если не принимать во внимание неровности границ, то его длина составляет примерно 570 км, а ширина – 320 км (<https://airinsail.ru/vasjuganskoe-boloto>). Его границы простираются в пределах 55°40'-58°60' с. ш. и 75°30'-83°30' в. д. Наличие водно-болотного объекта такого размера, несомненно, оказывает влияние на температурно-влажностные условия атмосферы региона.

Сравнение энергетических характеристик циклонов, образовавшихся над разными частями региона и в разное время года, приведено в табл. 1. Наибольшей внутренней энергией, как и следовало ожидать, обладают циклоны, сформировавшиеся в самой южной части территории, при этом энергия скрытой теплоты фазовых переходов для них незначительна. Циклонам же, образовавшимся над болотами северной и центральной частей исследуемого региона, свойственны высокие значения именно этого вида энергии.

Таблица 1. Энергия циклонов междуречья Обь-Иртыш*)

Table 1. Cyclonic energy in the Ob-Irtysh interfluve*)

Место образования циклонов в пространстве (границы широты и долготы)	Виды энергии			
	Внутренняя (E_i), 10^9 Дж/м ²		Энергия скрытой теплоты фазовых переходов воды (E_d), 10^7 Дж/м ²	
	ср. (σ)	макс.	ср. (σ)	макс.
60-64°с.ш., 60-90°в.д.	0.3 (0.01)	0.4	1.27 (0.3)	2.39
54-60°с.ш., 60-90°в.д.	0.3 (0.2)	0.6	0.42 (0.2)	0.66
50-54°с.ш., 60-90°в.д.	0.4 (0.1)	0.6	0.29 (0.1)	0.37

*) Сокращения: «ср». – среднее значение, «макс» – максимальное значение, « σ » – стандартное отклонение.

Как видно из данных табл. 2, средняя внутренняя энергия циклонов, образовавшихся в разные сезоны года и обусловленная наличием температурных контрастов одинакова, а ее вариативность невелика как во внутригодовом ходе, так и по территории. Энергия скрытой теплоты фазовых переходов, формируемая влагосодержанием атмосферы, особенно велика в теплый и переходный периоды года, а ее внутригодовая и пространственная вариативность достаточно велики.

Таблица 2. Средние значения энергии в циклонах в разные сезоны года

Table 2. A mean values of cyclonic energy in different seasons

Период года	$I, 10^9 \text{ Дж/м}^2$		$E_c, 10^7 \text{ Дж/м}^2$	
	ср	σ	ср	σ
Холодный	0.3	0.1	0.5	0.1
Теплый	0.3	0.01	1.6	0.6
Переходные	0.3	0.01	0.9	0.4

Температура воздуха в междуречье Обь-Иртыш

На фоне наметившегося в начале XXI века замедления глобального потепления, изменение климата России, в целом, характеризуется как продолжающееся потепление. Что касается территории Западной Сибири, то здесь эта тенденция сохраняется во все сезоны, кроме зимы (Второй оценочный доклад..., 2014).

Изменчивость приповерхностной температуры воздуха в регионе изучена на примере рядов наблюдений метеорологических станций Томской области, где расположена и часть Большого Васюганского болота. Исследование различных аспектов температурного режима по данным десяти метеорологических станций, расположенных на территории Томской области, были выполнены ранее в работе (Барашкова и др., 2014). Отмечается, что на всей территории области на фоне значительной межгодовой изменчивости средней годовой температуры воздуха существует ярко выраженная тенденция роста температуры, усилившаяся с 1970-х г. (скорость составила 0.4-0.6°C/10 лет). Самым теплым за весь период наблюдений в Томске стал 2015 г. со средней годовой температурой, равной 2.9°C. Однако для большей части рассматриваемой области рекорд значений средней годовой температуры остался за 1995 годом.

Согласно табл. 3 в 130-летний период времени 1887-2017 гг. средняя годовая температура воздуха быстрее росла в 1973-2017 гг. Особо следует обратить внимание на высокую скорость потепления в период 2008-2017 гг., во время которого также наблюдался существенный рост содержания метана в атмосфере (Voiland, 2016). Наиболее существенное увеличение значений температуры воздуха отмечается с февраля по май. Следует отметить, что в последнее десятилетие температура воздуха в августе также увеличилась значительно, и это увеличение статистически значимо.

Таблица 3. Скорость изменения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$), параметр R^2 , критерий оценки значимости t по данным наблюдений на метеорологической станции Томск

Table 3. The rate of air temperature changes ($^{\circ}\text{C}$ per decade), the coefficient of determination R^2 , significance criterion values t : observational data from the Tomsk weather station are used

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1887-2017	0.22	0.15	0.37	0.27	0.17	0.10	0.07	0.03	-0.01	0.10	0.20	0.27	0.17
R^2 , %	3.6	2.0	17.5	13.4	7.9	3.5	2.8	0.6	0.4	2.7	3.4	5.3	28.9
t	2.15	1.98	5.34	4.69	3.77	2.18	2.05	1.15	0.63	2.09	2.31	2.26	7.14
1973-2017	-0.31	0.68	0.84	0.76	0.45	0.30	0.08	0.19	-0.03	0.39	0.26	0.26	0.32
R^2 , %	0.8	5.2	14.5	12.9	7.5	3.3	0.6	3.8	0.1	6.6	0.9	0.6	14.2
t	0.59	1.55	2.73	2.55	1.89	1.22	0.50	1.32	0.18	1.76	0.61	0.51	2.70
2008-2017	7.3	8.7	1.9	3.5	0.5	3.6	1.2	2.0	-0.1	-4.6	-5.2	11.7	2.5
R^2 , %	34.6	30.9	10.2	34.0	0.8	18.9	4.5	39.8	0.0	35.6	17.8	31.9	37.1
t	2.18	2.01	1.01	2.15	0.26	1.45	0.65	2.44	0.04	2.23	1.40	2.05	2.31

Примечание: Параметр R^2 – доля дисперсии температуры, обусловленная трендом. Выделенные значения критерия Стьюдента t указывают на статистическую значимость положительного тренда температуры не менее чем на 5%-ном уровне значимости.

В связи с этим актуально выявить наличие пространственных неоднородностей в скорости долговременного изменения температуры воздуха над болотными комплексами Западной Сибири. На рисунках 4а–4в приведены средние за летние месяцы значения температуры воздуха у поверхности земли (на высоте 2 м над поверхностью земли.) по данным реанализа за три периода времени: 1990-1999 гг. (рис. 4а), 2000-2009 гг. (рис. 4б) и 2010-2019 гг. (рис. 4в).

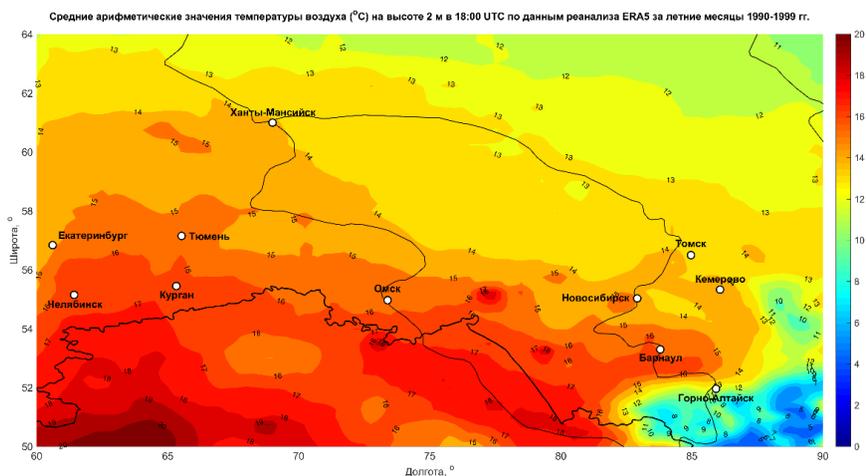


Рисунок 4а. Средние значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за летние месяцы у поверхности земли по данным реанализа ERA5 за период 1990-1999 гг.

Figure 4a. Mean values of surface air temperature in $^{\circ}\text{C}$ in the summer months according to ERA5 reanalysis for 1990-1999

Географическое распределение средних значений температуры за период 1990-1999 гг. можно назвать характерным для Западной Сибири. Зональность температуры нарушена ложбиной северо-восточного направления, которая прослеживается на всех ранних картах и схемах, представляющих климатические особенности Западной Сибири (Кусков, Катаев, 2006). Наличие такого распределения температуры воздуха над Западной Сибирью было замечено давно и обусловлено, возможно, наличием Большого Васюганского болота (БВБ).

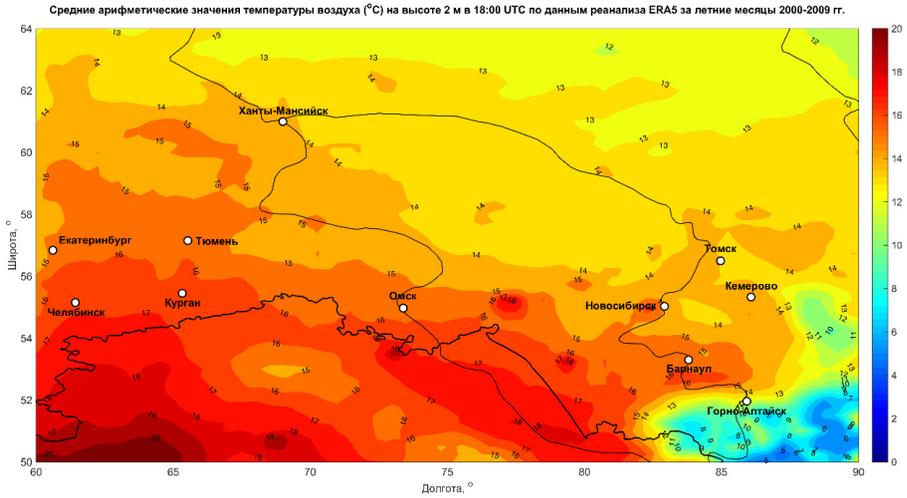


Рисунок 4б. Средние значения температуры воздуха (°C) за летние месяцы у поверхности земли по данным реанализа ERA5 за период 2000-2009 гг.

Figure 4b. Mean values of surface air temperature in °C in the summer months according to ERA5 reanalysis for 2000-2009

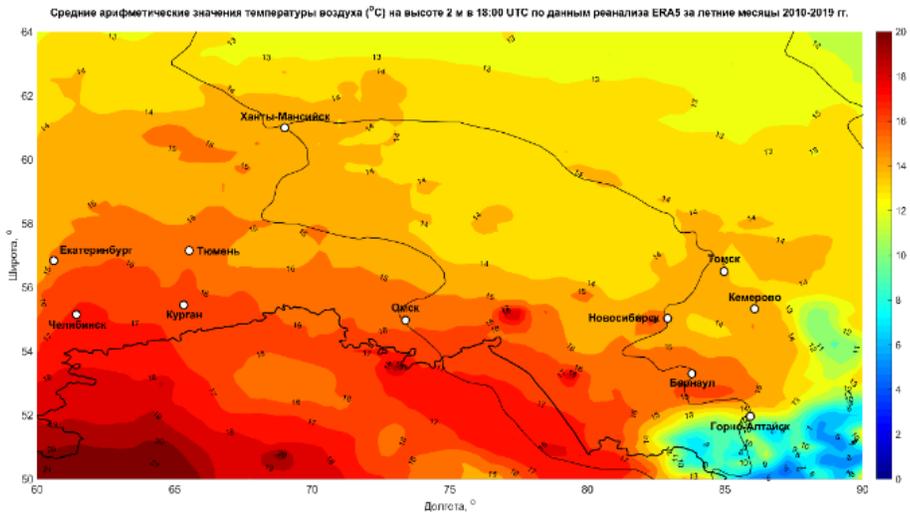


Рисунок 4в. Средние значения температуры воздуха (°C) за летние месяцы у поверхности земли по данным реанализа ERA5 за период 2010-2019 гг.

Figure 4c. Mean values of surface air temperature in °C in the summer months according to ERA5 reanalysis for 2010-2019

Изменчивость средних за летние месяцы значений температуры воздуха от одного десятилетия к другому наглядно демонстрируют изотермы 12°C, 13°C и 14°C. С каждым десятилетием они все более расширяют свои границы в направлении на север и северо-восток, при этом контуры изотерм становятся более неровными, что обусловлено неоднородностью прогрева подстилающей поверхности. При этом наибольшие изменения в положении изотерм приходятся на северные территории 60° с.ш. и выше. Контур изотермы 14°C особенно сильно продвинулся на север в окрестностях Ханты-Мансийска. При этом изотерма 12°C поднялась выше широты 64° с.ш. во всем долготном диапазоне исследуемой территории. Кроме того очевидно, что пространственной изменчивости положения изотерм на территориях, расположенных южнее 56° с.ш. не наблюдается. Заметим, что изотерма 14°C (рис. 4а) на протяжении всего исследуемого периода практически оконтуривала БВБ с его южной и западной сторон. Однако, в последующие десятилетия (рис. 4б–4в) пространственное распределение этой изотермы несколько изменилось. Над БВБ в последнее десятилетие появились температурные неоднородности, расположенные как внутри его территории, так и по его северному и восточному контурам (рис. 4в). В междуречье Обь-Иртыш, занятом болотами, и над болотным комплексом юго-западнее Ханты-Мансийска появились очаги тепла, на градус и более превышающие средние фоновые температуры. Заметим, что в районе Ханты-Мансийска в 2012 г. был замечен смерч (Курганский и др., 2013), триггерным механизмом которого, возможно, послужило наличие температурных неоднородностей подстилающей поверхности в условиях высокого влагосодержания атмосферы.

Очевидно, что в распределении значений средней температуры воздуха за летние месяцы наблюдаются заметные неопределенности. Они могут быть обусловлены как макроциркуляционными процессами, так и местными факторами.

Обсуждение

В большинстве случаев формирование местных циклонов в Западной Сибири, представляющих собой в основном мезомасштабные атмосферные вихри, обусловлено возникновением на тропосферном фронте динамически неустойчивых бароклинических волн (Елисеев, 2017). Бароклиническая неустойчивость определяется как динамическая неустойчивость в основном переносе. Она связана с наличием перпендикулярного потоку градиента температуры и, как следствие, термического ветра. Формированию бароклинической неустойчивости в районе междуречья Обь-Иртыш способствуют неоднородности прогрева подстилающей поверхности (особенно в дни с отсутствием облачности или ее малом количеством) и наличие как зональных, так и меридиональных градиентов температуры. О наличии такого механизма формирования местного циклона над территорией Западной Сибири говорит процент волновых циклонов и их серий (74%).

Возникновение одновременно нескольких циклонов, образующихся вследствие «фронтальной неустойчивости», характерно для полярных областей

(севернее 70°с.ш.), однако их можно встретить также и в других регионах (Заболотских и др., 2010). Над территорией Западной Сибири такой процесс формирования волновых циклонов наблюдается в 22% случаев. При этом волновые циклоны как одиночные, так и смещающиеся сериями, представляют собой, как правило, достаточно глубокие барические образования, «живущие» более 2 суток, которые локализуются в 87% на севере и в центре территории во все сезоны года.

Роль термического фактора, тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью в процессе местного циклогенеза очень велика (Ferreira et al., 2016). При перемещении с холодной на более теплую поверхность пришедшая воздушная масса насыщается теплом и влагой. Быстрое образование облачности с выделением скрытого тепла приводит к развитию глубокой конвекции и образованию интенсивного мезоциклона. Полученные в работе (Тунаев, Горбатенко, 2018) высокие значения энергии скрытой теплоты фазовых переходов воды свидетельствуют о наличии этого механизма на исследуемой территории в теплый период года.

Есть основание полагать, что развитие мезоциклонов над Западной Сибирью достаточно эффективно описывается и концепцией так называемой условной неустойчивости второго рода (*conditional instability of the second kind – CISK*) (Fu et al., 2004), суть которой заключается в представлении о взаимодействии и взаимном усилении возмущений двух различных масштабов – глубокой влажной конвекции и циклонического вихря (Harold et al., 1999). Вихрь привносится извне и может быть следствием бароклинной неустойчивости, имеющей место в области возникновения этого возмущения, орографических влияний и других факторов. Присутствие циклонической циркуляции обуславливает конвергенцию воздуха к центру, где развивается мощная конвекция в условно-неустойчивом воздухе с выделением тепла, происходит взаимное усиление циклонической циркуляции и конвекции, в результате чего развивается интенсивный мезоциклон. Важнейшая особенность условной неустойчивости второго рода, в отличие от бароклинной неустойчивости, состоит в том, что источником ее энергии является выделение скрытого тепла при глубокой конвекции, а не кинетическая либо потенциальная энергия основного потока.

Опираясь на результаты исследования энергетики циклонов, образовавшихся над Западной Сибирью (Тунаев, Горбатенко, 2018), есть основания полагать, что этот механизм может способствовать образованию мезоциклонов и в исследуемом районе. Исследования показывают, что синоптические вихри формируются как низкие барические образования и охватывают на начальных стадиях своего развития только нижний слой тропосферы толщиной 1.5-3 км. Следовательно, в реальных условиях наиболее часто потеря устойчивости происходит именно в нижних слоях атмосферы. Присутствие планетарных волн и близость высотной фронтальной зоны, вдоль которой отмечаются повышенные градиенты температуры и давления, расширяет возможности возникновения синоптических вихрей в атмосфере и формирует районы, наиболее благоприятные для зарождения циклонических синоптических вихрей, так называемые

бароклинно-активные районы (Simmons, Hoskins, 1978), к которым можно отнести территорию междуречья Обь-Иртыш с его особым микроклиматом. Здесь расположены огромные резервуары пресной воды в виде многочисленных рек и озер, которые являются дополнительным источником влаги.

Заметим, что циклоны, «живущие» в течение одних суток, формируются чаще всего на севере рассматриваемой территории. В данном случае, при их образовании решающим может служить динамический фактор вследствие близости высотной фронтальной зоны.

Для подтверждения влияния местных температурно-влажностных особенностей на процесс циклогенеза важно изучать энергетические особенности местных циклонов, и в первую очередь, запасы их внутренней энергии, определяемой температурным фоном и энергии фазовых переходов, которая зависит от влагосодержания атмосферы.

Поскольку максимум процессов генерации циклонов приходится на август, когда подстилающая поверхность прогревается особенно сильно (Тунаев и др., 2017), объяснением повышенной активности циклогенеза в теплый период года предположительно является увеличение бароклинности приземного слоя как за счет температуры воздуха, так и увеличения влагосодержания во всей толще тропосферы за счет дополнительного прогрева, возможную причину которого мы обсудим в этом разделе ниже.

Внутригодовой ход значений энергии скрытой теплоты фазовых переходов (Тунаев, Горбатенко, 2018) также подтверждает выдвинутые предположения. Повышенные значения энергии скрытой теплоты фазовых переходов весной и осенью (табл. 2), очевидно, имеют адвективный характер и обусловлены активизацией влияния ПВФЗ в эти сезоны года и усилением циклонической активности в целом. В дни местного циклогенеза, как правило, вблизи исследуемой территории господствуют глубокие интенсивные циклоны, которые охватывают всю толщу тропосферы. При смещении на территорию Западной Сибири они приносят с собой теплый и влажный воздух с океана, вследствие чего повышается содержание водяного пара в верхних слоях тропосферы. В холодный период года значения энергии скрытой теплоты фазовых переходов минимальные. Средняя внутренняя энергия циклонов (табл. 2), образовавшихся в разные сезоны года одинакова, а энергия фазовых переходов особенно велика в теплый и переходный периоды и может быть сформирована по причине дополнительной влаги в атмосфере, поднимающейся с болотных комплексов Западной Сибири. Замечено, что при удалении от дополнительных источников влаги местные циклоны быстро теряют энергию.

С 2008 г. отмечается существенное увеличение числа циклонов. Заметим, что выявление циклонов на синоптических картах выполнялось одним и тем же исследователем и по единой методике. Возможно, что это связано с увеличением бароклинности атмосферы междуречья Обь-Иртыш в последнее десятилетие вследствие изменения свойств подстилающей поверхности. Эти свойства обусловлены биогеофизическими (специфической неоднородностью поверхности) и биогеохимическими (эмиссией метана) особенностями огромных водно-болотных комплексов Западной Сибири.

Заболоченность Западно-Сибирской равнины (70.4 млн. га) относится к мировому природному феномену, и на Земле сложно найти территорию, где бы болота занимали такие огромные площади (Васюганское болото..., 2003). Известно, что глобально болота поглощают углекислый газ и продуцируют метан и кислород многими миллионами тонн. В (Полищук и др., 2015) представлены результаты измерений вертикальных потоков метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2) в растительных сообществах мезоолиготрофного болота средней тайги в период вегетации. В течение сезона максимум выделения метана в атмосферу наблюдается в июле.

Кроме того, на основе биогеохимических исследований было установлено, что концентрация метана в малых термокарстовых озерах площадью менее $200\text{-}250\text{ м}^2$, в среднем, приблизительно в 13 раз превышает концентрацию метана в воде озер, площадь которых более 250 м^2 (Полищук и др., 2015). Заметим, что до последнего времени считалось, что усиление парникового эффекта от метана в 25 раз больше, чем от углекислого газа, в расчете на заданную массу выброса. Однако, в настоящее время Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) утверждает, что «парниковый потенциал» метана еще опаснее, чем оценивалось раньше (Семенов, Попов, 2011).

Согласно измерениям наземных станций (Бажин, 2010) и картам глобального масштаба, опубликованным NASA, в Западной Сибири имеется очаг высоких поступлений метана в атмосферу (рис. 5).

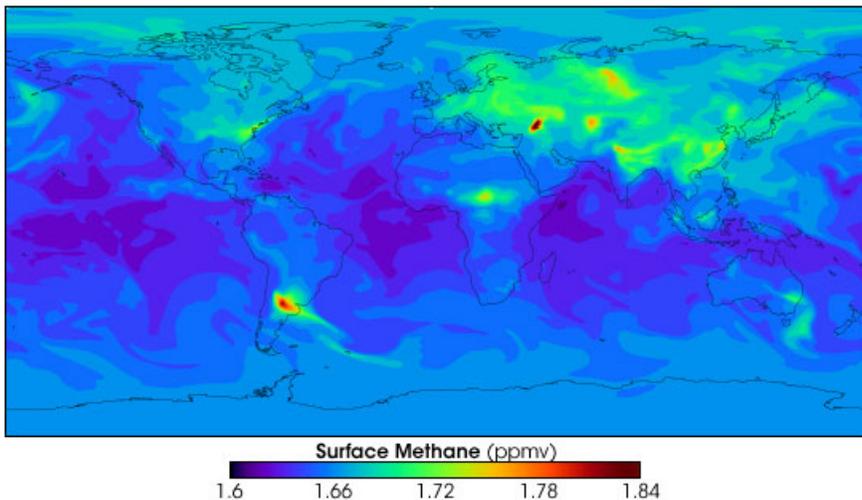


Рисунок 5. Содержания метана в тропосфере, рассчитанное с помощью компьютерной модели NASA (<https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=5270>)
Концентрации указаны в частях на миллион по объему

Figure 5. The distribution of methane in the troposphere calculated with NASA computational model (<https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=5270>)
Concentrations are shown as volume mixing ratio in parts per million

Согласно исследованиям Earth System Research Laboratory (США) (<https://www.climate.gov/>) в 1985 г. средняя концентрация метана в тропосфере Земли составляла 1620 ppb (частей на миллиард), а к 2015 году она увеличилась до

1800 ppb. До промышленной революции концентрации оставались стабильными на уровне около 700 ppb (Voiland, 2016).

Однако темп роста в последние десятилетия был не постоянным. В период с 1980 по 1992 год содержание метана возрастало примерно на 12 ppb в год. Затем наступило десятилетие, в котором отмечалась фаза медленного роста на 3 ppb в год. В период с 2000 по 2007 год концентрации метана в атмосфере стабилизировались, а начиная с 2007 года, содержание метана характеризуется устойчивым ростом со скоростью 6 ppb в год.

Анализ экспериментальных данных о потоках метана в атмосферу с поверхности озер тундровой зоны Западной Сибири (Голубятников, Казанцев, 2013) позволил авторам утверждать, что для тундровых озер, донные отложения которых насыщены органическим веществом, характерен интенсивный поток метана в атмосферу, более чем в три раза превышающий поток из озер без значительных органических донных отложений.

Болотные системы Западной Сибири значительно отличаются между собой растительным покровом, строением торфяных залежей, гидротермическим режимом. В работе (Веретенникова, Дюкарев, 2019) рассматриваются две контрастные болотные экосистемы: открытая осоково-сфагновая топь и сосново-кустарничково-сфагновое болото, расположенные в зоне южной тайги Западной Сибири. Они являются элементами одного крупного болотного массива сильно заболоченной Васюганской равнины. Над обеими системами замечен выраженный сезонный ход эмиссии метана с максимальными потоками в летние месяцы. Однако, открытая топь выделяет в 4-6 раз больше метана, чем сосново-кустарничково-сфагновое болото.

Над территориями с интенсивным выделением метана его концентрации будут, естественно, повышенными. Учитывая высокую способность метана усиливать парниковый эффект, можно ожидать и увеличения значений температуры воздуха над этими комплексами. Наибольшего температурного эффекта от повышенного содержания метана в приземном воздухе Западной Сибири, согласно (Глаголев, Шнырев, 2008), можно ожидать в течение месяца после сезонного максимума выделения метана в атмосферу.

Ожидаемо, что эти увеличения происходят неравномерно над всей рассматриваемой территорией по причине разнообразия структуры болотного комплекса, а фрагментарно, что может увеличивать бароклинность атмосферы (Нечепуренко и др., 2018) над этим регионом. И даже если этот процесс не играет решающей роли в имеющихся тенденциях потепления климата Сибири в целом, его вклад в изменение климата на региональном уровне может быть значительным.

Если принять во внимание тот факт, что средние значения скорости ветра над районами, прилегающими к территориям болот, и ранее были невелики (Горбатенко и др., 2018), а в последнее десятилетие стали еще меньше, то это обстоятельство также способствует увеличению неоднородности прогрева нижних слоев атмосферы.

В заключение этого раздела отметим следующее. Согласно (Глаголев, Шнырев, 2008) колебание температуры сказывается на глубине метаноген-

ного слоя с запаздыванием приблизительно в месяц, а короткопериодные колебания температуры на поверхности практически не отражаются на температуре слоя. Долговременное повышение температуры в весенне-летний период способствует, по-видимому, более глубокому прогреву почвы, что увеличило толщину метаногенного слоя и объем поступления метана в атмосферу. Этим можно объяснить наибольшую скорость потепления для августа за период 2008-2017 гг. (см. табл. 3).

Заключение

Взаимодействие факторов глобального потепления климата с региональными природными системами – малоизученная область наук о Земле. Современное увеличение содержания парниковых газов в атмосфере Земли вызывает потепление, которое оказывает влияние на природные системы. В ответ происходят изменение свойств этих систем и возникает обратное воздействие на состояние атмосферы и всей климатической системы Земли.

Эти процессы характерны и для Западной Сибири, для междуречья Обь-Иртыш. Уникальный природный объект – Большое Васюганское Болото (БВБ) – не только является объектом воздействия глобального изменения климата, но и способно в значительной мере формировать местные особенности климата и его изменений в ответ на сигнал глобального потепления – температурно-влажностного режима и вихревой активности атмосферы, включая местный циклогенез.

Результаты данного исследования показывают, что и температурно-влажностный режим, и свойства местных циклонов, и сам режим циклогенеза в регионе в последние десятилетия заметно изменились.

При расширении этих исследований за счет дальнейшего развития мониторинга состояния БВБ и моделирования этой уникальной природной системы можно получить весьма ценную научную информацию по фундаментальным и прикладным аспектам формирования климата региона в условиях глобальных изменений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 18-45-700010 p_a).

Список литературы

Бажин Н.М. 2010. Метан в окружающей среде. – Новосибирск, ГПНТБ СО РАН, 56 с.

Барашкова Н.К., Волкова М.А., Кужевская И.В. 2014. Оценка термического режима воздуха и тенденций процессов антициклогенеза на юге Западной Сибири в прикладных целях. – Вестник Томского государственного университета, серия «Науки о земле», № 387, с. 225-232.

Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование). 2003. 2-е изд. /Под ред. Л.И. Инишевой. – Томск, ЦНТИ, 212 с.

Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. 2019. Эмиссия метана с поверхности верховых болот Западной Сибири. – Тезисы докладов российской конференции “Тринадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу”. – Томск, Аграф-Пресс, с.162-163.

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. – Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/date>. (дата обращения 12 сентября 2018)

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. – М., Росгидромет, 1008 с.

Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия CH_4 естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции. – Вестник МГУ, сер. Почвоведение, № 2, с. 24-36.

Голубятников Л.Л., Казанцев В.С. 2013. Вклад тундровых озер Западной Сибири в метановый бюджет атмосферы. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, т. 49, № 4, с. 324-333.

Горбатенко В.П., Журавлев Г.Г., Носырева О.В., Волкова М.А., Кижнер Л.И., Константинова Д.А. 2018. Современные изменения климатических условий, определяющих накопление снега на автомобильных дорогах Томской области. – Фундаментальная и прикладная климатология, т. 4, с. 39-54.

Елисеев А.В. 2017. Линейные и нелинейные модели бароклинных волн в атмосфере. – В сб.: Нелинейные волны 2016. – Нижний Новгород, ИПФ РАН, с. 129-142.

Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Дикинис А.В., Неелова Л.О., Смирнова Ю.Е. 2010. Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей. – Ученые записки РГГМУ, № 16, с. 59-76.

Калинин Н.А. 2009. Динамическая метеорология: учебник. 2-е изд., испр. – Перм. ун-т, РГГМУ, СПб., Пермь, Пермское книжное издательство, 256 с.

Курганский М.В., Чернокульский А.В., Мохов И.И. 2013. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом. – Метеорология и гидрология, № 8, с. 40-50.

Кусков А.И., Катаев С.Г. 2006 Структура и динамика приземного температурного поля над Азиатской территорией России. – Томск, Изд-во Томского государственного педагогического университета, 176 с.

Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. 2018. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью. – Гидрометеорологические исследования и прогнозы, № 368, с. 44-59.

Платонов В.С., Новикова Е.В. 2019. Оценка качества воспроизведения современными реанализами экстремальных метеорологических характеристик в регионе Карского моря. – Тезисы докладов конференции к 100-летию со дня рождения М.А. Петросянца «М.А. Петросянец и отечественная метеорология». – М., Тирекс, с. 48.

Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., Брыксина Н.А., Покровский О.С., Кирпачин С.Н., Широкова Л.С. 2015. Методические вопросы оценки запасов метана в малых термокарстовых озерах криолитозоны Западной Сибири. – Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов., т. 326, № 2, с. 127-135.

Семенов С.М., Попов И.О. 2011. Сравнительные оценки влияния изменения концентраций диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности. – Метеорология и гидрология, № 8, с. 34-33.

Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. 2017. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976-2015 гг. – Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 364, с. 81-92.

Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П. 2018. Энергетические характеристики атмосферы при циклогенезе над районами Васюганского болота. – Гидрометеорологические исследования и прогнозы, № 4 (370), с. 48-62.

Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. 2020. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (accessed March 3, 2020).

Ferreira J.A., Liberato M.L.R., Ramos A.M. 2016. On the relationship between atmospheric water vapour transport and extratropical cyclones development. – Phys. Chem. Earth., No. 94, pp. 56-65. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.01.001> (accessed March 20, 2020).

Fu G., Hiroshi N., Ryuji K., Teruyuki K.A. 2004 Polar Low over the Japan Sea on 21 January 1997. Part I: Observational Analysis. – Mon. Wea. Rev., vol. 132, pp. 1537-1551.

Harold J.M., Bigg G.R. Turner J. 1999. Mesocyclone activity over the northeast Atlantic. Part 1: Vortex distribution and variability. – Journal of Climatology, No. 19 (11), pp. 1187-1204.

IPCC, 2019. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Available at: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>.

Simmons A. J., Hoskins B. J. 1978. The life cycles of some nonlinear baroclinic waves – Journal of the Atmospheric Sciences, No. 35 (3), pp. 414-432.

Voiland A. 2016. Methane matters. – Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MethaneMatters> (accessed March 8, 2016).

Статья поступила в редакцию: 15.11.2019 г.

После переработки: 17.04.2020 г.

THE DYNAMICS OF CYCLOGENESIS OVER WESTERN SIBERIA IN 1976-2017

V.P. Gorbatenko^{1)*}, *E.L. Tunaev*²⁾, *K.N. Pustovalov*¹⁾, *M.A. Volkova*¹⁾,
*O.E. Nechepurenko*¹⁾

¹⁾National Research Tomsk State University,
36 Lenin st., 634050, Tomsk, Russian Federation;
*corresponding author: vpgor@tpu.ru

²⁾West Siberian Administration for Hydrometeorology and Monitoring environment,
30 Sovetskaya st., 630099, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. A change in the frequency and intensity of extratropical cyclones is one of the effects of contemporary global warming. Western Siberia relate to the territory under the influence of active cyclonic activity. Enlarged mid-latitude cyclogenesis in the Ob-Irtysh interfluve (50-64°N, 60-90°E) is a key feature of the study region in which a unique natural site is located – the Vasyugan Swamp (The Great Vasyugan Mire also). About 20% of all cyclones which determine the actual weather conditions form above this territory. The paper presents the features of the spatial arrangement of cyclones formed over the territory of Western Siberia and the totality of their characteristics for 1976-2017. The analyzed characteristics of cyclones are follow: the frequency of formation in different seasons, life cycle, pressure in the center, internal energy and latent heat energy of phase transitions of water, as well as the intra-annual and interannual variability of these characteristics. It has been found, that the local cyclones mostly form on the waves of a pre-existing frontal systems, in 52% of cases belong to single wave, in 22% – a series of wave cyclones (or a “family” of cyclones). These are the deepest and one of the most vertically developed local cyclones. Cyclones formed on the secondary fronts (near the surface, low) are 13% of cases; the same share – in the trough of main baric depression. In the intra-annual course, an increased number and the greatest “life” of local cyclones occurs in the warm season. The maximum of cyclogenesis referred to August (on average, 5 cyclones with life span more than 5 days), when the underlying surface tends to warming up especially strongly. In the same month, the lowest pressure in the centers of the cyclones has been observed.

The local temperature conditions are described in detail. It has been found the noticeable changes in some of these characteristics within 2008-2017 compared to the previous period. Assumptions are made about the causes of the detected changes – the inverse effect of the Vasyugan Swamp, which is changing due to global warming and causing impact on the formation of the local climate, including the temperature and humidity regime and regional cyclogenesis. One of the factors of this inverse effect relate to enlarged wetland methane emission.

Keywords. Ob-Irtysh interfluve, local cyclones, temperature-humidity regime, the Vasyugan Swamp, feedbacks, methane.

References

Bazhin N.M. 2010. *Metan v okruzhayushchey srede* [Methane in the environment]. Novosibirsk, 56 p.

Barashkova N.K., Volkova M.A. Kuzhevskaya I.V. 2014. Otsenka termicheskogo rezhima vozdukha i tendentsiy protsessov antitsiklogeneza na yuge Zapadnoy Sibiri v prikladnykh tselyakh [Evaluation of the thermal regime of air and trends in the processes of anticyclogenesis in the south of Western Siberia for applied purposes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, seriya "Nauki o zemle"* – *Bulletin of Tomsk State University, a series of "Earth Sciences"*, no. 387, pp. 225-232.

Vasyuganskoye boloto (prirodnyye usloviya, struktura i funktsionirovaniye). 2 izdanie, pod red. L.I. Inishevoy. 2003. [Vasyugan swamp (natural conditions, structure and function) 2nd ed., Ed. L.I. Inisheva]. Tomsk, 212 p.

Veretennikova Ye.E., Dyukarev Ye.A. 2019. Emissiya metana s poverkhnosti verkhovykh bolot Zapadnoy Sibiri [Methane emission from the surface of high bogs in Western Siberia]. *Tezisy dokladov rossiyskoy konferentsii "Trinadtsatoye Sibirskoye soveshchaniye i shkola molodykh uchenykh po klimatoekologicheskomu monitoringu"* [Abstracts of the Russian conference "The Thirteenth Siberian Conference and the School of Young Scientists on Climate and Environmental Monitoring"]. Tomsk, pp.162-163.

Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii – Mirovoy tsentr dannykh [All-Russian research Institute of Hydrometeorologyworld data cente]. – Available at: <http://meteo.ru/date> (accessed September 12, 2018)

Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. 2014. [Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation]. Moscow, 1008 p.

Glagolev M.V., Shnyrev N.A. 2008. Letne-osennyya emissiya SN_4 yestestvennymi bolotami Tomskoy oblasti i vozmozhnosti yeye prostranstvenno-vremennoy ekstrapolyatsii [Summer-autumn CH_4 emission by natural swamps of the Tomsk Region and the possibility of its spatio-temporal extrapolation]. *Vestnik MGU, ser. Pochvovedeniye – Bulletin of Moscow State University, ser. Soil Science*, no. 2, pp. 24-36.

Golubyatnikov L.L., Kazantsev V.S. 2013. Vklad tundrovyykh ozer Zapadnoy Sibiri v metanovyy byudzhnet atmosfery [Contribution of the tundra lakes of Western Siberia to the methane budget of the atmosphere]. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana – Proceedings of the RAS. Physics of the Atmosphere and the Ocean*, vol. 49, no. 4, pp. 324-333.

Gorbatenko V.P., Zhuravlev G.G., Nosyreva O.V., Volkova M.A., Kizhner L.I., Konstantinova D.A. 2018. *Covremennyye izmeneniya klimaticheskikh usloviy,*

opredelyayushchikh nakopleniye snega na avtomobil'nykh dorogakh Tomskoy oblasti [Present-day changes of climatic conditions determining the accumulation of snow at the motor roads of Tomsk region]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and applied climatology*, vol. 4, pp. 39-54.

Yeliseyev A.V. 2017. Lineynyye i nelineynyye modeli baroklinnykh voln v atmosfere [Linear and nonlinear models of baroclinic waves in the atmosphere]. *Nelineynyye volny'2016 – Nonlinear Waves '2016*. Nizhniy Novgorod, pp. 129-142.

Zabolotskikh Ye.V., Bobylev L.P., Dikinis A.V., Neyelova L.O., Smirnova YU.Ye. 2010. Osobennosti formirovaniya i klassifikatsiya shtormovykh mezomasshtabnykh vikhrey [Peculiarity of formation and classification of the storm mesoscale eddies]. *Uchenyye zapiski RGGMU – Scientific notes of the RSHU*, no. 16, pp. 59-76.

Kalinin N.A. 2009. *Dinamicheskaya meteorologiya: uchebnik. 2-ye izd., ispr.* [Dynamic meteorology: a textbook. 2nd ed.]. St. Petersburg, Perm', 256 pp.

Kurganskiy M.V., Chernokul'skiy A.V., Mokhov I.I. 2013. Smerch pod Khanty-Mansiyskom: poka isklyucheniye ili uzhe simptom [The tornado over Khanty-Mansiysk: an exception or a symptom]. *Meteorologiya i gidrologiya – Russian Meteorology and hydrology*, no. 8, pp. 40-50.

Kuskov A.I., Katayev S.G. 2006 *Struktura i dinamika prizemnogo temperaturnogo polya nad Aziatskoy territoriyey Rossii* [Structure and dynamics of the surface temperature field over the Asian territory of Russia]. Tomsk, 176 p.

Nechepurenko O.Ye., Gorbatenko V.P., Konstantinova D.A., Sevast'yanov V.V. 2018. Indeksy neustoychivosti atmosfery i ikh porogovyye znacheniya, optimal'nyye dlya prognoza groz nad Sibir'yu [Indices of atmospheric instability and their threshold values that are optimal for the forecast of thunderstorms over Siberia]. *Gidrometeorologicheskkiye issledovaniya i prognozy – Hydrometeorological studies and forecasts*, no. 368, pp. 44-59.

Platonov V.S., Novikova Ye.V. 2019. Otsenka kachestva vosproizvedeniya sovremennymi reanalizami ekstremal'nykh meteorologicheskikh kharakteristik v regione Karskogo moray [Evaluation of the quality of reproduction by modern reanalyses of extreme meteorological characteristics in the Kara Sea region]. *Tezisy dokladov konferentsii k 100-letiyu so dnya rozhdeniya M.A. Petrosyantsa «M.A. Petrosyants i otechestvennaya meteorologiya»* [Abstracts of reports on the 100th anniversary of the birth of M.A. Petrosyantsa “M.A. Petrosyants and Russian Meteorology”]. Moscow, p. 48.

Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bryksina N.A., Pokrovskiy O.S., Kirpotin S.N., Shirokova. L.S. 2015. Metodicheskkiye voprosy otsenki zapasov metana v malykh termokarstovykh ozerakh kriolitozony Zapadnoy Sibiri [Methodological issues of estimating methane reserves in small thermokarst lakes of the permafrost zone of Western Siberia]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources*, vol. 326, no. 2, pp. 127-135.

Semenov S.M., Popov I.O. 2011. Sravnitel'nyye otsenki vliyaniya izmeneniya kontsentratsiy dioksida ugleroda, metana, zakisi azota i vodyanogo para na radiatsionno-ravnesnyuyu temperaturu zemnoy poverkhnosti [Comparative estimates of the effect of changes in the concentrations of carbon dioxide, methane, nitrous oxide and water vapor on the radiation-equilibrium temperature of the earth's surface]. *Meteorologiya i gidrologiya – Russian Meteorology and hydrology*, no. 8, pp. 34-33.

Tunayev Ye.L., Gorbatenko V.P., Podnebesnykh N.V. 2017. Osobennosti tsiklogeneza nad territoriyey Zapadnoy Sibiri za period 1976-2015 gg. [Features of cyclogenesis over the territory of Western Siberia for the period 1976-2015]. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii – Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, no. 364, pp 81-92.

Tunayev Ye.L., Gorbatenko V.P. 2018. Energeticheskiye kharakteristiki atmosfery pri tsiklogeneze nad rayonami Vasyuganskogo bolota [Energy characteristics of the atmosphere during cyclogenesis over areas of the Vasyugan swamp]. *Gidrometeorologicheskkiye issledovaniya i prognozy – Hydrometeorological Research and Forecasting*, no. 4 (370), pp. 48-62.

Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. 2020. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> (accessed March 3, 2020).

Ferreira J.A., Liberato M.L.R., Ramos A.M. 2016. On the relationship between atmospheric water vapour transport and extratropical cyclones development. – *Phys. Chem. Earth.*, no. 94, pp. 56-65. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.01.001> (accessed March 20, 2020).

Fu G., Hiroshi N., Ryuji K., Teruyuki K. A. 2004 Polar Low over the Japan Sea on 21 January 1997. Part I: Observational Analysis. – *Mon. Wea. Rev.*, vol. 132, pp. 1537-1551.

Harold J.M., Bigg G.R. Turner J. 1999. Mesocyclone activity over the northeast Atlantic. Part 1: Vortex distribution and variability. – *Journal of Climatology*, no. 19 (11), pp. 1187-1204.

IPCC, 2019b. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Available at: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page>.

Simmons A. J., Hoskins B. J. 1978 The life cycles of some nonlinear baroclinic waves. – *J. Atmos. Sci.*, no. 35 (3), pp. 414-432.

Voiland A. 2016. Methane matters. – Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MethaneMatters> (accessed March 8, 2016).