

УДК 551.515

<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-50-57>

ISSN 1812-5220

© Проблемы анализа риска, 2019

# Новый прогностический индикатор неблагоприятных и опасных явлений погоды — градиент интегральной спиральности поля скорости атмосферных движений<sup>1</sup>

**А. А. Макоско,**

президиум РАН,  
Институт физики атмосферы  
им. А. М. Обухова РАН,  
Межведомственный центр  
аналитических исследований  
в области физики, химии  
и биологии при президиуме  
РАН,  
119991, РФ, г. Москва,  
Ленинский проспект, д. 14

**Л. О. Максименков\*,**

Институт физики атмосферы  
им. А. М. Обухова РАН,  
119017, РФ, г. Москва,  
Пыжевский пер., д. 3

## Аннотация

Выявлены некоторые новые свойства интегральной спиральности, в частности дипольность структуры ее поля. С учетом этого обстоятельства введен новый, более информативный и наглядный критерий оценки интегральной спиральности — градиент интегральной спиральности, перспективный при анализе и прогнозе неблагоприятных и опасных явлений погоды.

На примере конвективной бури в Москве 29.05.2017 показаны прогностическое свойство и наглядность введенного критерия как прогностического индикатора неблагоприятных и опасных явлений погоды. Учитывая, что подобная конвективная буря прогнозируется всего за пару часов или даже за несколько десятков минут, предложенный критерий, обеспечивающий заблаговременность прогноза порядка 12 часов, может стать важным звеном в технологической линии прогнозов опасных явлений погоды и основой значимого резерва снижения экономического ущерба из-за метеорологических причин.

**Ключевые слова:** градиент интегральной спиральности, прогностический критерий, опасные явления погоды.

**Для цитирования:** Макоско А.А., Максименков Л.О. Новый прогностический индикатор неблагоприятных и опасных явлений погоды — градиент интегральной спиральности поля скорости атмосферных движений // Проблемы анализа риска. Т. 16. 2019. №2. С. 50—57, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-50-57>

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке программ фундаментальных исследований президиума РАН № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», № 56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности», № 55 «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

# New prognostic indicator of adverse and dangerous weather phenomena — gradient of the integral helicity of the atmospheric motion velocity field<sup>1</sup>

**Alexander A. Makosko,**

Presidium of the Russian Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics A. M. Obukhov RAS, Interdepartmental Center for Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the RAS, 119991, Russia, Moscow, Leninsky Avenue, 14

**Leonid O. Maximenkov\*,**

Institute of Atmospheric Physics A. M. Obukhov RAS, 119017, Russia, Moscow, Pyzhevsky Lane, 3

**Annotation**

Some new properties of integral helicity are revealed, in particular, the dipole structure of the structure of its field. Taking this circumstance into account, a more informative and illustrative criterion for evaluating integral helicity is a gradient of integral helicity that is promising in analyzing and forecasting adverse and dangerous weather phenomena.

Using the example of a convective storm in Moscow 05.29.2017. Indicators of predictive quality and clarity, used as diagnostic indicators and dangerous weather phenomena. Considering that such a convective storm is predicted in just a couple of hours, or even several tens of minutes, the proposed criterion, which ensures the forecast lead time of about 12 hours, can become an important link in the technological line for predicting dangerous weather phenomena and a significant reserve for reducing economic damage due to meteorological reasons.

**Keywords:** gradient of integral helicity, prognostic criterion, dangerous weather phenomena.

**For citation:** Makosko Alexander A., Maximenkov Leonid O. New prognostic indicator of adverse and dangerous weather phenomena — gradient of the integral helicity of the atmospheric motion velocity field // Issues of Risk Analysis. Vol. 16. 2019. No.2. P. 50—57, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-2-50-57>

**Содержание**

Введение

1. Новые свойства интегральной спиральности по данным реанализа
2. О прогностическом значении интегральной спиральности
3. Новый прогностический критерий — градиент интегральной спиральности

Заключение

Литература

<sup>1</sup> Work is performed with assistance of programs basic researches of presidium of RAS No. 51 "Climate change: reasons, scratches, consequences, problems of adaptation and regulation", No. 56 "Fundamental fundamentals of breakthrough technologies for the benefit of national security", No. 55 "Basic basic scientific research for the benefit of development of the Arctic zone Russian Federations".

## Введение

Наблюдаемые и прогнозируемые климатические изменения как на глобальном, так и на региональных уровнях влекут устойчивые тенденции усиления интенсивности опасных явлений погоды и обусловленных ими стихийных бедствий, увеличения причиняемого экономике ущерба, повышения возможности наступления событий и их последствий, опасных для жизни человека. По данным [1], размер ущерба по метеорологическим причинам в настоящее время достигает 1% ВВП России и растет ежегодно.

Важным резервом снижения такого вида ущерба является увеличение заблаговременности и повышение оправдываемости прогнозов неблагоприятных и опасных явлений погоды. На фоне новых научных результатов, полученных в последние годы в науках об атмосфере Земли, в настоящей работе предлагается новый прогностический индикатор неблагоприятных и опасных явлений погоды — градиент интегральной спиральности поля скорости атмосферных движений.

Интегральная спиральность поля скорости для атмосферных движений  $h$  имеет вид

$$h = \int_0^{H_b} s dz, s = \vec{V} \cdot \text{rot} \vec{V},$$

где  $z$  — высота;  $H_b$  — высота верхней границы атмосферы;  $\vec{V}$  — вектор скорости ветра.

Это понятие в современных исследованиях по геофизической гидродинамике и динамической метеорологии широко применяется, прежде всего, в качестве диагностической характеристики интенсивных вихрей. В ряде случаев спиральность имеет и прогностическое значение как предиктор циклогенеза для тропических и средиземноморских циклонов (см. обзор [2]), полярных мезоциклонов [3], начала муссонной циркуляции [4]. Для этого используются различные критерии оценки или индексы — предикторы спиральности (интегральная, относительная, поток).

Учитывая исключительно высокую актуальность анализа и прогноза атмосферных процессов, обуславливающих опасные явления погоды, и потенциальные свойства интегральной спиральности, цели работы состоят в выявлении по данным реанализа некоторых новых свойств интегральной спиральности, перспективных при анализе и про-

гнозе атмосферных движений, и обосновании нового информативного критерия оценки интегральной спиральности.

## 1. Новые свойства интегральной спиральности по данным реанализа

Рассматривались данные за 4 срока наблюдений (00, 06, 12, 18 UTC) следующих реанализов ECMWF:

- над территорией, охватывающей европейскую часть России, Сибирь и Восточную Европу: 19.04.2018—23.04.2018 (20 сроков наблюдений), 28.05.2017—30.06.2018 (136 сроков наблюдений),
- над территорией, охватывающей Атлантику и восточную часть Северной Америки: 28.08.2011—11.09.2011 (60 сроков наблюдений — тропический ураган “Katia”).

Анализ последовательности карт, построенных по вышеуказанным данным реанализа с шагом 6 часов, показывает следующее.

Поля интегральной спиральности представляют собой последовательное чередование максимумов и минимумов. Последние существенно подвижнее барических образований (БО): скорость их перемещения может превышать 100 км/ч.

Для рассматриваемых данных реанализа суммарная площадь областей положительных значений интегральной спиральности превышает суммарную площадь отрицательных значений, т. е. доминирует циклоническая циркуляция.

В области развитых БО часто наблюдается дипольная структура максимумов и минимумов в поле спиральности. Особенно четко это прослеживается для тропического урагана. В средних широтах наблюдается вращательное движение дипольной структуры против часовой стрелки вокруг циклона.

Перемещение циклонов происходит, как правило, близко к прямой, соединяющей эти экстремумы, в сторону максимума. Для антициклона — соответственно, в сторону минимума, но выражено слабо.

Чем больше разница в поле спиральности между максимумом и минимумом диполя, тем, как правило, глубже циклон.

Чем больше расстояние между этими экстремумами, тем, как правило, выше скорость перемещения циклона. При исчезновении диполя наблюдается стационарирование циклона.

Некоторые из приведенных выводов иллюстрируются рис. 1, 2.

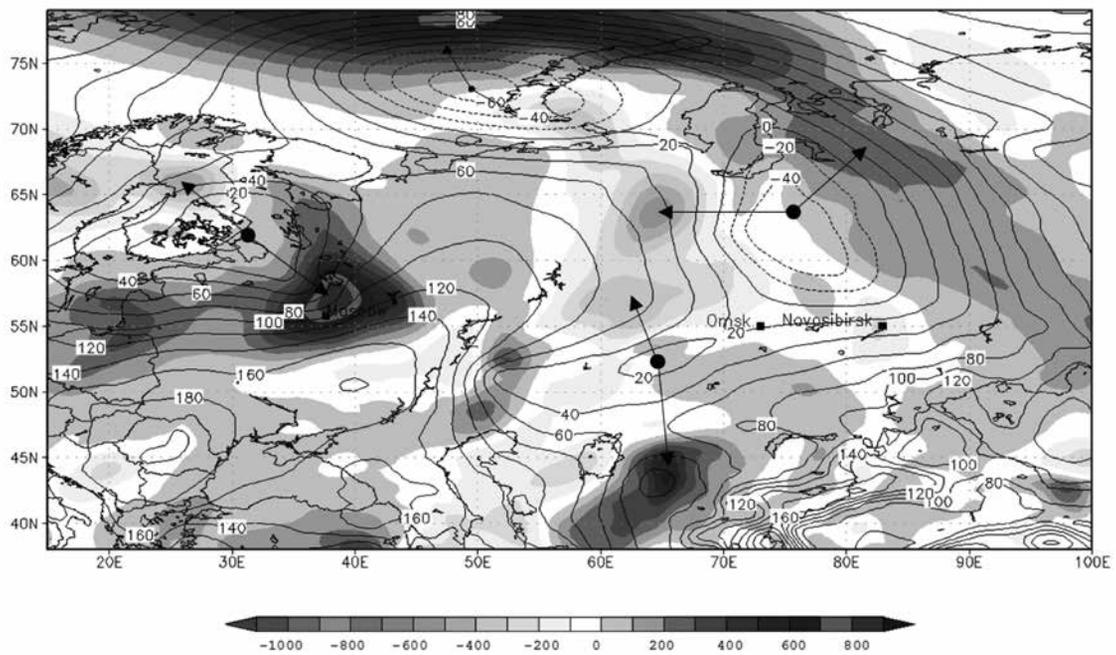


Рис. 1. Поле интегральной спиральности  $h$  ( $m^2/s^2$ ) и поле изогипс  $H$  (м) поверхности 1000 гПа за 00 UTC 29.05.2017  
 Figure 1. The field of integral helicity  $h$  ( $m^2/s^2$ ) and the field of isohyps  $H$  (m) of the surface of 1000 hPa per 00 UTC 29/05/2017

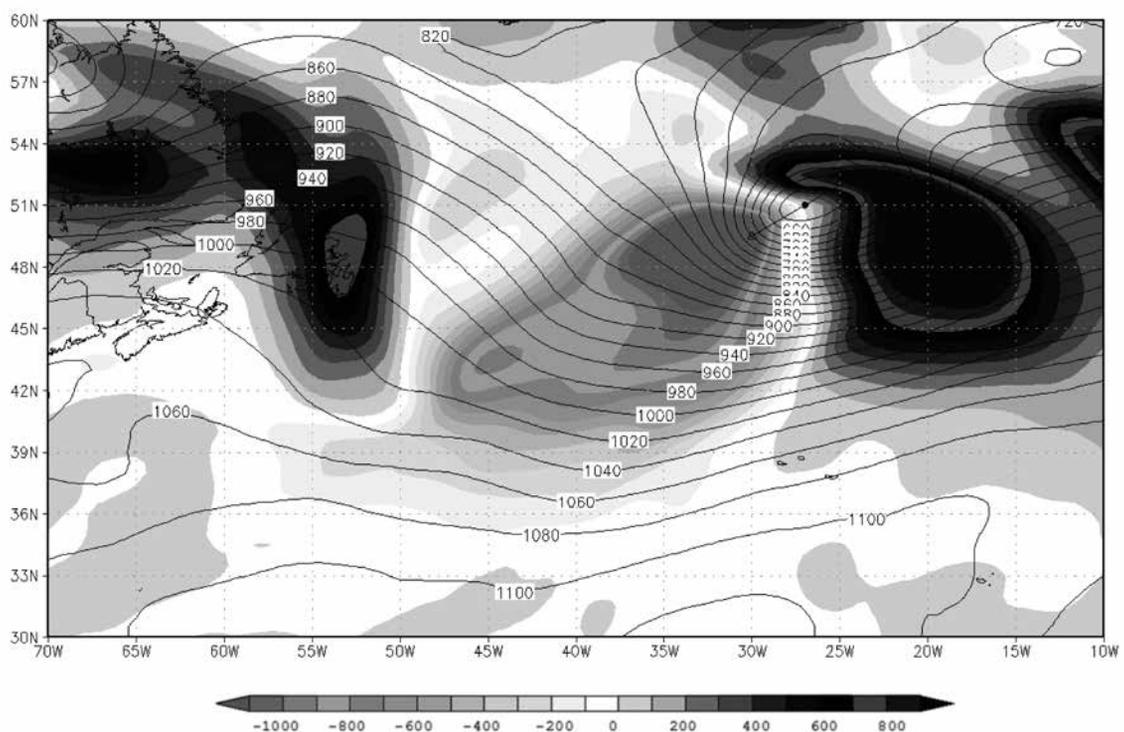


Рис. 2. Поле  $h$  ( $m^2/s^2$ ) и поле изогипс  $H$  (м) поверхности 1000 гПа за 12 UTC 11.09.2011 (тропический ураган "Katia")  
 Figure 2. Field  $h$  ( $m^2/s^2$ ) and field isohyps  $H$  (m) of the surface of 1000 hPa for 12 UTC 11/09/2011 (tropical hurricane "Katia")

## 2. О прогностическом значении интегральной спиральности

Как известно, тенденция высоты изобарической поверхности  $q$  зависит от значений начальных полей во всех точках пространства. Эта зависимость устанавливается посредством интеграла типа свертки начальных полей с функцией Грина некоторого эллиптического дифференциального уравнения [5]. При функции Грина под знаком интеграла фигурирует адвекция поля температуры, которая пропорциональна спиральности в квазигеострофическом приближении.

С учетом отмеченного представляется интересным оценить эмпирически, будет ли тенденция высоты изобарической поверхности, например 1000 гПа, пропорциональной интегральной спиральности геострофического потока.

На рис. 3 представлено поле тенденции  $q$ , рассчитанное на поверхности 1000 гПа по формуле  $q \approx \frac{H^{t+\delta t} - H^{t-\delta t}}{\delta t}$ , где  $\delta t = 12$  ч. Сравнение поля тенденции  $q$  на рис. 3 и поля интегральной спи-

ральности  $h$  на рис. 1 показывает их очень хорошее совпадение с поправкой на знак. Проверочные расчеты, выполненные с помощью выражения  $H^{t+\delta t} \approx H^{t-\delta t} - \delta t \cdot b \cdot h_g$ , показали хорошее соответствие рассчитанного поля  $H^{t+\delta t}$  наблюдаемому. Коэффициент  $b$  принимался равным  $b = \frac{l}{g}$ , где  $g$  — ускорение свободного падения;  $l$  — параметр Кориолиса.

## 3. Новый прогностический критерий — градиент интегральной спиральности

С учетом дипольности структуры поля спиральности логично будет в качестве нового прогностического критерия рассмотреть градиент интегральной спиральности

$$M = \overline{V}h,$$

где  $\overline{V}$  — оператор Гамильтона, а черта сверху означает осреднение при расчетах по горизонтальной

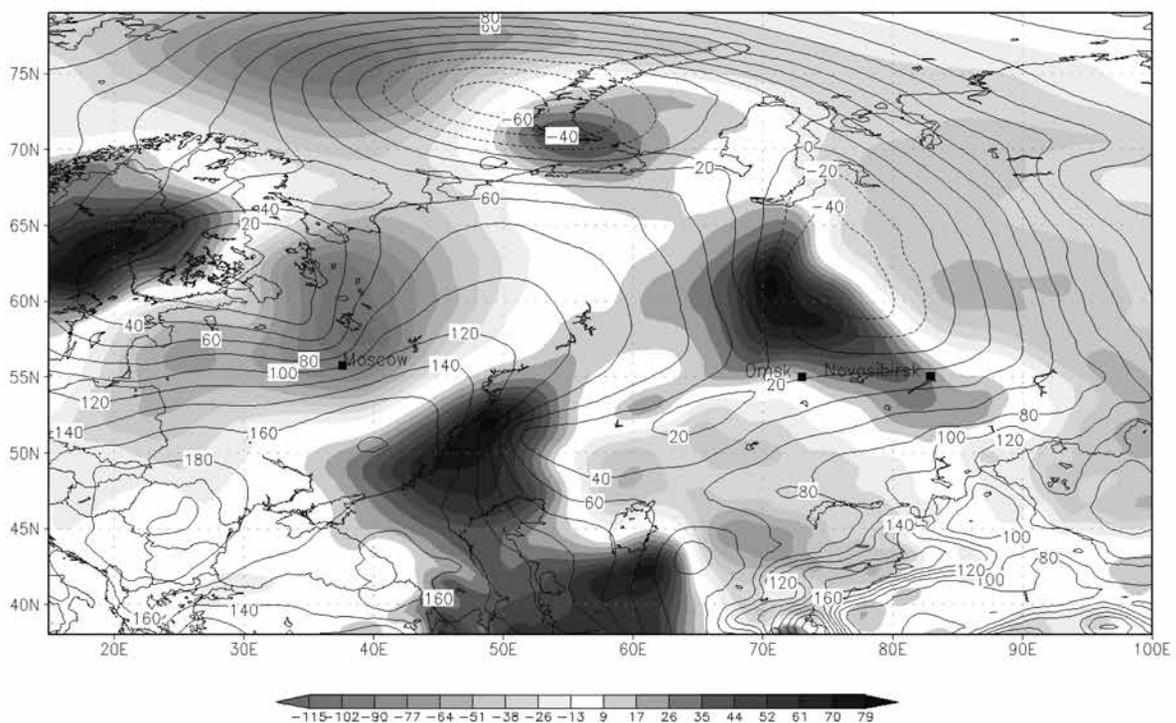


Рис. 3. Поле  $q$  (м/с) на поверхности 1000 гПа и поле изогипс  $H$  (м) поверхности 1000 гПа за 00 UTC 29.05.2017

Figure 3. The field  $q$  (m/s) on a surface of 1000 hPa and the field of isohyps  $H$  (m) of a surface of 1000 hPa per 00 UTC 29/05/2017

поверхности в пределах двух шагов сетки относительно точки расчета.

Рассмотрим ситуацию 29.05.2017 в районе Москвы. Как известно, в этот день наблюдалась конвективная буря в Москве, в результате которой погибло 11 человек и более 160 пострадало. Шквалистый ветер обрушился на Москву во второй половине дня, между 15 и 16 часами местного времени. По области разброс скорости ветра составил от 12 до 30 м/с.

Синоптическая ситуация определялась южной периферией подвижного циклона, который смещался с Финского залива на восток. Ранним утром столицу пересек его теплый атмосферный фронт, Москва попала в теплый сектор циклона — температура повысилась до +25 °С. Во второй половине дня подошел холодный фронт. Обостренный в пе-

риод максимального прогрева он и стал причиной неблагоприятных и опасных явлений погоды [6].

На кольцевой карте погоды (вставка справа на рис. 4) за 12 UTC 29.05.2017 вдоль зоны сходимости векторов критерия  $M$  располагается холодный фронт, на котором наблюдается интенсивная грозовая деятельность, а южнее — область сильного юго-западного ветра.

На рис. 4 представлено поле критерия  $M$ , поле  $h$  и поле  $H$  за 00 UTC 29.05.2017 над территорией, охватывающей европейскую часть России, частично Сибирь и Восточную Европу. Анализ этого рисунка показывает, что в 00 UTC 29.05.2017 в районе Москвы сформировалась область высоких (до  $900 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ) значений интегральной спиральности. Эта ситуация наглядно отражена в поле критерия  $M$ . Наблюдается резкая сходимость векторов этого

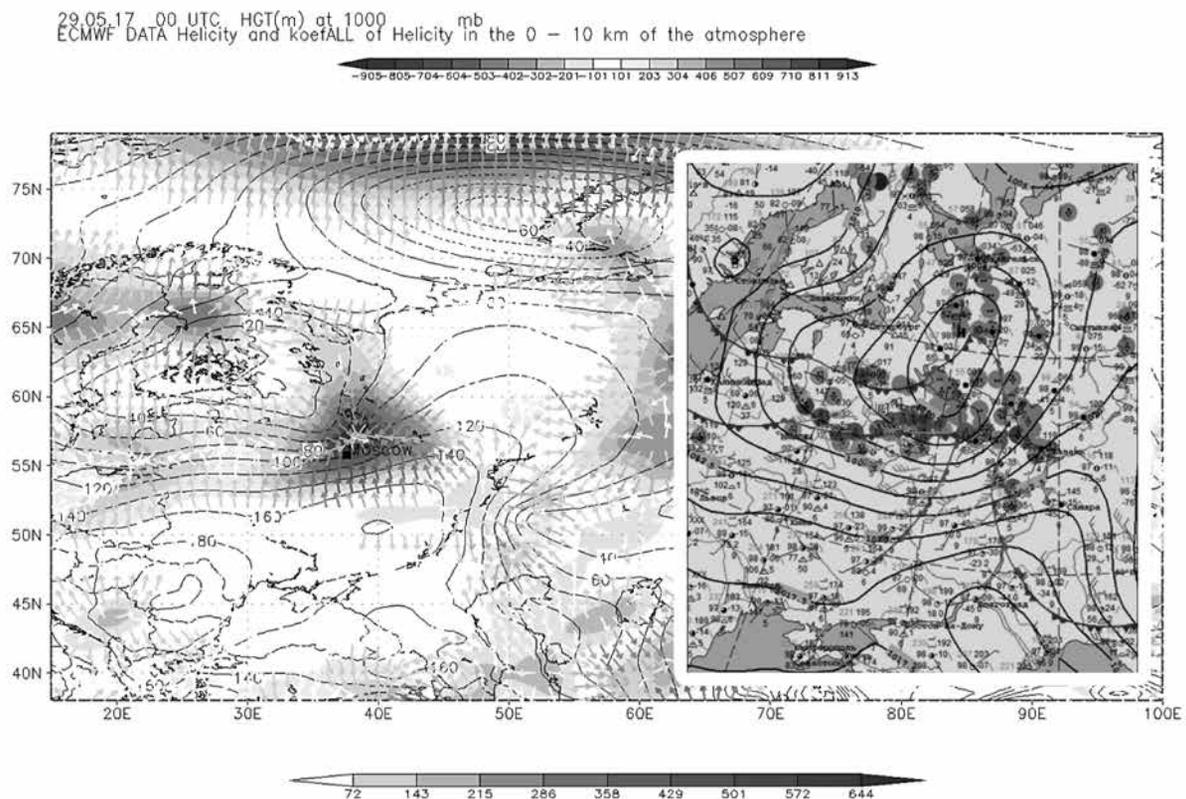


Рис. 4. Векторное поле  $M$  ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ , нижняя шкала), поле  $h$  ( $\text{м}^2/\text{с}^2$ , верхняя шкала) и поле изогипс  $H$  (м) поверхности 1000 гПа за 00 UTC 29.05.2017. Вставка справа — кольцевая карта погоды за 12 UTC 29.05.2017

Figure 4. Vector field  $M$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ , lower scale), field  $h$  ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ , upper scale) and field isohyps  $H$  (m) of the surface of 1000 hPa for 00 UTC 29/05/2017. Inset on the right is a ring weather map for 12 UTC 29/05/2017

критерия: южнее Москвы векторы направлены с юга на север, их значения достигают  $600 \text{ м/с}^2$ , а севернее области сходимости векторы направлены с северо-запада и с северо-востока, их значения составляют порядка  $300 \text{ м/с}^2$ .

Сопоставление области резкой сходимости векторов критерия  $M$  в 00 UTC и зон гроз и интенсивного ветра в 12 UTC указывает на прогностическое свойство (заблаговременность 12 часов) и наглядность градиента интегральной спиральности как прогностического индикатора неблагоприятных и опасных явлений погоды.

Подобные конвективные бури могут отмечаться каждый сезон и по несколько раз за сезон. Однако, по статистике, средняя повторяемость такого сочетания факторов составляет 5 лет. Важно отметить, что подобная конвективная буря прогнозируется всего за пару часов или даже за несколько десятков минут [6]. Поэтому предложенный критерий  $M$ , обеспечивающий заблаговременность прогноза порядка 12 часов, может стать важным звеном в технологической линии прогнозов опасных явлений погоды.

## Заключение

Таким образом, по данным реанализа выявлены некоторые новые свойства интегральной спиральности, перспективные при анализе и прогнозе атмосферных движений. На наш взгляд, исключительно важным является выявление в поле интегральной спиральности дипольных структур, изучение которых в настоящей статье только намечено.

Показано, что тенденция высоты изобарической поверхности 1000 гПа пропорциональна интегральной спиральности геострофического потока.

Введен новый, информативный и наглядный критерий оценки интегральной спиральности. Учитывая дипольность структуры поля спиральности в качестве нового прогностического критерия, предложен градиент интегральной спиральности. На примере конвективной бури в Москве 29.05.2017 показаны его прогностическое свойство (заблаговременность 12 часов) и наглядность как прогностического индикатора неблагоприятных и опасных явлений погоды. Учитывая, что подобная конвективная буря прогнозируется всего за пару часов или даже за несколько десятков минут, предложенный критерий  $M$ , обеспечивающий заблаговременность прогноза порядка 12 часов, может стать важным

звеном в технологической линии прогнозов опасных явлений погоды и основой значимого резерва снижения экономического ущерба из-за метеорологических причин.

## Литература [References]

1. Быков А.А., Башкин В.Н. Об экстремальных природных явлениях и оценке природных и экологических рисков // Проблемы анализа риска. 2018. Т. 15. №3. С. 4—5. [Bykov A.A., Bashkin V.N. About the extreme natural phenomena and assessment of natural and environmental risks // Issues of Risk Analysis. Vol. 15. 2018. No. 3. P. 4—5. <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-3-4-5> (Russia).]
2. Курганский М.В. Спиральность в атмосферных динамических процессах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. 2017. № 2. С. 147—163. [Kurgansky M.V. Helicity in Dynamic Atmospheric Processes // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53. No. 2. P. 147—163 (Russia).] DOI: 10.7868/S0002351517020079
3. Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О., Курганский М.В. Интегральные характеристики полярных мезоциклонов // БШФФ-2017. С. 246—248. [Vazaeva N.V., Chkhetiani O.G., Maksimenkov L.O., Kurgansky M.V. Integral characteristics polar mesocyclones // BSHFF-2017. P. 246—248 (Russia).]
4. Макоско А.А., Рубинштейн К.Г. Исследование спиральности азиатского муссона по данным реанализа и результатам численного моделирования циркуляции атмосферы с учетом неоднородности силы тяжести // ДАН. Т. 459. 2014. № 2. С. 237—242. [Makosko A.A., Rubinstein K.G. Study of a Helical Asian Monsoon Based on Reanalysis of Data and the Results of Numerical Modeling of Atmospheric Circulation with Account for the Inhomogeneous Gravity Force // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 459. No. 1. P. 1451—1456 (Russia).] DOI: 10.7868/S0869565214320176
5. Булеев Н.И., Марчук Г.И. О динамике крупномасштабных атмосферных процессов // Труды / Институт физики атмосферы АН СССР. 1958. № 2. С. 66—104. [Buleev N.I., Marchuk G.I. On the dynamics of large-scale staff atmospheric processes // Proceedings / Institute physics of the Academy of Sciences of the USSR. 1958. No. 2. P. 66—104 (Russia).]
6. Конвективная буря в Москве: детали, причины, статистика. 2017. 30 мая. <https://www.gismeteo.ru/news/klimat/23835-konvektivnaya-burya-v-moskve-detali-prichiny-statistika/>. [Convective storm in Moscow: details, reasons, statistics. 2017, May 30th.]

## Сведения об авторах

**Макоско Александр Аркадьевич:** доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель главного ученого секретаря президиума Российской академии наук (РАН)

Количество публикаций: более 300

Область научных интересов: динамическая метеорология, диагноз климата, атмосферные примеси, экологическая безопасность, гравитационное поле Земли, геомедицина

*Контактная информация:*

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 14

Тел.: +7 (499) 237-27-21, (499) 237-69-10

E-mail: aam@pran.ru

**Максименков Леонид Олегович:** ведущий инженер Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

Количество публикаций: более 30

Область научных интересов: атмосферные примеси, экологическая безопасность, геомедицина

*Контактная информация:*

Адрес: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3

Тел.: +7 (495) 951-13-47

E-mail: leonidmax@gmail.com

---

Авторы выражают благодарность Р. М. Вильфанду за любезно предоставленные картографические материалы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 21.11.2018

Дата принятия к публикации: 11.03.2019

Дата публикации: 30.04.2019

*Authors express gratitude to R.M. Vilfandu for kindly provided cartographic materials.*

*The authors declare no conflict of interest.*

*Came to edition: 21.11.2018*

*Date of acceptance to the publication: 11.03.2019*

*Date of publication: 30.04.2019*