

## **УНИВЕРСАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ: РЕКОНСТРУКЦИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ**

*С.М. Абдуллаев*

Представлены методы нового объектно-ориентированного подхода к прогнозу опасных явлений погоды, объединяющего наблюдение, моделирование и климатологию объектов на основе реконструкций жизненного цикла конвективных систем,

Ключевые слова: прогноз, опасные явления, конвективные системы, жизненный цикл, реконструкция, климатология, дистанционные методы численное моделирование, функции принадлежности.

В докладе представлены принципы, промежуточные результаты и перспективы разработки объектно-ориентированного подхода к анализу и прогнозу опасных явлений погоды и неблагоприятных условий среды, учитывающего общие и индивидуальные особенности эволюции атмосферных объектов. Подход назван нами «универсальным алгоритмом» диагноза и прогноза [1, 2], поскольку на единой платформе он включает элементы различных разделов метеорологии (рис. 1). В том числе, новый подход объединяет дистанционные наблюдения, численное моделирование и

климатологию атмосферных объектов; ассимилирует результаты большинства прогностических технологий и производит вероятностные и детерминированные прогнозные оценки; быстро адаптируется к изменению качества исходной информации и др. Ниже, кратко излагаются основы подхода и особенности разрабатываемых методов анализа систем глубокой конвекции. Алгоритмы прогноза опасных явлений погоды, в том числе новые результаты в прогнозе грозовой активности излагаются во второй части тезисов.

Необходимое условие реализации подхода – это формализация ряда общепринятых понятий об объектах окружающей среды и принципов их применения в предметной области. В частности, ключевым для «универсального алгоритма» является понятие «жизненный цикл» – подразумевающее существование вполне различных фаз эволюции природных и природно-антропогенных систем, таких как стадии зарождения, формирования, зрелости и диссипации объекта (о.).

Описание о. и определение стадий жизненного цикла – отдельные задачи предметных областей естествознания и выражены в концепции «жизненного цикла» [3, 4]. В практической реализации концепции требуется соблюсти три постановочных системных принципа.

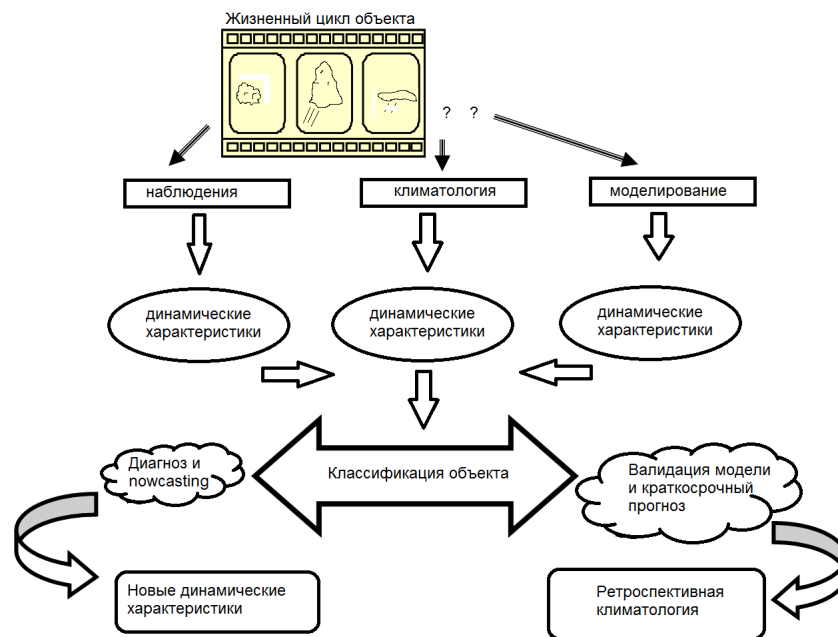


Рис. 1. Объектно-ориентированный подход, объединяющий наблюдения жизненного цикла, климатологию и численный прогноз динамических характеристик объекта

Во-первых, учесть, общее системное свойство о. – каждый из них, одновременно является системой и элементом (подсистемой) систем большего пространственно-временного масштаба. Пример – эволюция и иерархия систем кучево-дождевой облачности [3]. Группа объектов «ячейка Сb», на разных стадиях, составляют о. «конвективный шторм» или «малые» под-

системы. Последние на разных этапах жизненного цикла организуются в «большие» ансамбли. Эволюция несколько ансамблей штормов определяет жизненный цикл объект «мезомасштабная конвективная система» (МКС).

Во-вторых, необходимо учесть специфику связей элементов систем – характер их взаимодействия. В частности, взаимодействие мезомасштабных циркуляций приводит к установлению различных морфологических структур МКС. К примеру, на стадии максимальной интенсивности поля осадков МКС могут иметь линейную, дугообразную, спиралевидную и более сложные комплексные «трехмерные» формы [5]. Классификация систем (рис. 1) на этом не заканчивается. Так на стадии зрелости линейные МКС – мезомасштабные линии шквала в зависимости от направления развития новых элементов по отношению трансляции системы могут классифицироваться на быстрые, сверхбыстрые, медленные и сверхмедленные, симметричные и асимметричные системы [1, 2, 3, 6 и др.].

В-третьих, следует охарактеризовать региональные и индивидуальные особенности выбранных объектов. Среди прочего необходимо охарактеризовать синоптическую, сезонную, климатическую региональную повторяемость типов МКС [7]. Целесообразно, соотнести преимущественные морфолого-эволюционные типы систем осадков со стадиями о. «внетропический циклон» и «фронтальная система» [7]; установить их частоты в отдельных состояниях о. «климатическая система», таким как фазы Северо-Атлантического Колебания или Эль-Ниньо-Южное Колебание. Вслед за этой оценкой «репрезентативности» региональной выборки мезомасштабных систем можно перейти к индивидуальным особенностям о. с целью установить морфологические типы штормов, стадии и формы МКС предпочтительные к производству опасных явлений – гроз, осадков, града шквалов и смерчей.

Изложенные выше принципы подхода «универсальный алгоритм» – объединены в комплекс взаимосвязанных между собою методов и методик. Универсальный алгоритм (рис. 1) включает три основных этапа: 1) анализ наблюдаемой эволюции атмосферного объекта и климатологическое описание его жизненного цикла; 2) динамическую реконструкцию наблюдаемого и моделируемого объекта и оценку качества численного моделирования; 3) разработку функций принадлежности универсального алгоритма прогноза.

Исследование эволюции МКС и связанных с ними опасных явлений погоды включает выделение характерных стадий их развития, описание основных элементов и образованных ими структур на каждой фазе жизни, а также включает характеристику связей между элементами всех масштабов и другие необходимые компоненты реконструкции жизненного цикла МКС. Различают «мезоклиматологическую» и «динамическую» реконструкцию. В рамках реконструкций первого типа применимы все формы эмпирических обобщений – от простейших каталогов с характеристиками опасных явлений сопутствовавшим морфологии и стадиям мезомасштаб-

ных систем до моделей эволюции и схем прогноза опасных явлений. Однако обеспечение преемственности различных форм обобщения между собой, а так же их воспроизведения в новых наблюдениях и при численном моделировании, требует разработки правил, содержащих критерии однозначной идентификации объектов классификации на различных стадиях их эволюции. Для этого в реконструкциях используются набор динамических характеристик объекта (рис.1), отражающих кинематику, интенсивность, геометрическую форму, пространственное и временное положение объекта. Кумулятивные распределения повторяемостей динамических характеристик – один из результатов мезоклиматологической реконструкции. В качестве иллюстрации мезоклиматологической реконструкции приведем пример исследований одной из наиболее сложных МКС – мезомасштабных комплексов локальных штормов (МКЛШ). В том числе, кратко поясним понятие «доминирующие» скопления, «трансляция» и «развитие», которые использованы в методах обобщения морфологических, кинематических и эволюционных характеристик грозоградовых штормов, и собственно динамических характеристик объекта «конвективный шторм» [1, 8–11]. Среди множества разработанных или модифицированных нами методов реконструкции, мы выделили малую их толику – наиболее простых, не требующих пространственных комментариев, но не теряющих новизну методов, методик и алгоритмов: объективной селекции доминирующих штормов и конструировании его типовой структуры (рис.2, а и б), метод векторов (рис.2 в) и метод траекторий (рис. 2 г), и метод доминирующих скоплений (рис. 2 е). В том числе мы включили в рассказ одну из простейших концептуальных моделей [8–11], объясняющую результаты предыдущих методов.

Объективная селекция доминирующих штормов (рис. 2 а) Одной из важных опорных точек в эволюции МКС является стадия максимальной интенсивности конвективных явлений [1–8]. С другой стороны, концепция [1, 3] предполагает, что в любой МКС, имеющей масштабы ~ 300 км и время конвективной активности 7–8 часов, можно объективно выделить два доминирующих шторма, ответственных за главные максимумы её интенсивности: абсолютный и второй по значимости. Селекция доминирующих штормов [1, 2, 7, 8] позволяет избежать субъективности климатологических обобщений, использующих выборку штормов, сформированную на критериальных порогах отражаемости или опасных явлений погоды: такие выборки часто включают несоразмерное количество элементов различных МКС, даже если соблюдено условие сопоставимости стадий системы. Это очевидно при сравнении, изображений горизонтальных полей радиолокационной отражаемости на стадии максимума трех различных комплексов локальных штормов (рис. 2 а). *Типовая композиционная структура.* Объективная селекция штормов важна для определения типовой структуры, масштабов и эволюции наиболее мощных локальных штормов (рис. 2 б). Так обобщенный образ шторма на рисунок 2 б получен измерением пара-

метровдоминирующих локальных штормов в точке близкой к максимуму его развития и измерили его параметры. Эти шторма как мы видим, в среднем имеют размеры около 25–30 км, причем значительная часть кучево-дождевого облака «нависает» над поверхностью земли – это его новая развивающиеся элементы-«ячейки». Значительное время жизни доминирующих штормов (1,5–2 часа) позволяет с уверенностью определить их среднюю скорость и сделать оценку предсказуемости направления развития.

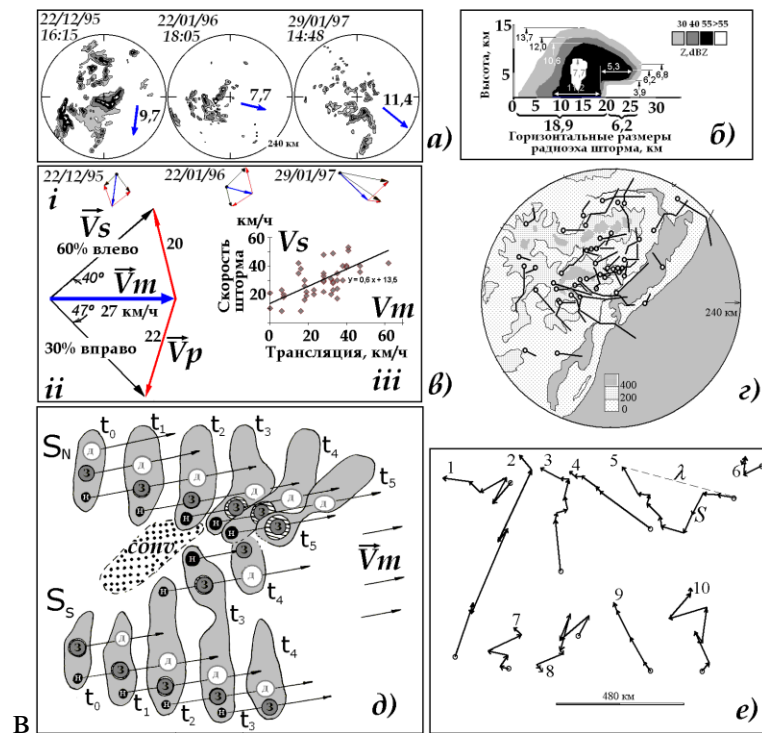


Рис. 2. Исследование мезомасштабных комплексов локальных штормов (МКЛШ). а) Стадия максимума летних МЛКШ южной Бразилии, стрелка – пассивная трансляция  $V_m$  б) Вертикальная структура отражаемости, осредненная по ИДВ, на максимуме доминирования грозо-градовых штормов 17 МКС. в) Векторный метод: i) декомпозиция средних скоростей индивидуальных штормов  $V_{ш}$  на трансляцию  $V_m$  и развитие; ii) осреднение скоростей и повторяемостей лево- и праводвижущихся 44 штормов; iii) скорости штормов в зависимости от трансляции. г) Метод траекторий: траектории доминирующих штормов аккумулируются на карту ландшафтов региона. д) Концептуальная модель эволюции скоплений  $S_b$  вблизи стационарных зон конвергенции объясняет причины доминирования и жизненный цикл локальных штормов в северном полушарии. е) Метод доминирующих скоплений: траектории максимумов интенсивности  $\alpha$ -кластера в движущейся системе координат. Начало траектории (первый квазичасовой максимум) отмечено кружком, последующие максимумы – стрелками. Цифры от 1 до 10 соответствуют различным МКЛШ южного полушария. Для случая 5 показана длина траектории  $S$  и отрезок  $\lambda$  соединяющий начало и конец траектории. Адаптировано из [3, 8]

Метод векторной декомпозиции (рис.2в). Постановка вопроса о кинематических динамических характеристиках – движении шторма, его трансляции  $\vec{v}_m$  и его развитии  $\vec{v}_p$  имеет важное методическое значение при поиске причин появления конкретного шторма. Трансляция – это общее движение всей МКС и её элементов, с некоторой скоростью характеризующий крупномасштабный ведущий поток, а развитие – это видимое перемещение системы за счет появления новых элементов. Разложение скоростей доминирующих штормов южного полушария на трансляцию и развитие (рис. 2 в, i) обнаруживает предполагаемые закономерности. Первое правило «закон сохранения развития» – наличие характерной скорости развития штормов 20–25 км/ч. Второе «правило полушарий» касается преимущественного направления движения штормов и «правило двух третей» для доминирующих штормов: в северном (южном) полушарии две трети штормов для доминирующих отклоняются вправо (влево) от направления трансляции, и одна треть штормов «нарушает» правило полушария (рис. 2 в, ii). Третье «правило ускорения и замедления»: шторма имеют тенденцию смещаться быстрее (медленнее) трансляции, когда ее значения меньше (больше), чем  $23 \div 25$  км/ч (iii). Последнее наблюдение вытекает из уравнений регрессии, связывающих движение доминирующего шторма и трансляцию  $V_S = 0,6V_m + 13,5$  км/ч и  $V_S = 0,5V_m + 12,3$  км/ч для 200 (100) штормов с  $Z > 40$  (55) dBZ. Очевидно, что для высоких скоростей потока в средней тропосфере скорость шторма приближается сверху к половине  $V_m$ . Малые скорости ведущего потока и шторма скорее свидетельствуют об отсутствии условий для предпочтительного направления развития шторма мезо-β. Очевидно, что положение всех штормов на небольшой промежуток моменты времени вперед можно предсказать, предварительно определив скорость трансляции и добавив к ней средний вектор развития. С другой стороны траектории доминирующих штормов часто отклоняется от этой «линейной» модели рисунка 2 в.

Метод траекторий доминирующих штормов (рис. 2 г) заключается в многолетнем аккумулировании траекторий доминирующих штормов принадлежащих одному типу МКС на подходящую ландшафтную карту региона. Отметим две очевидные закономерности, полученные этим методом. «Океаническое правило» состоит в том, что летние шторма – это су-губо континентальное явление: их развитие, начинаясь на суше, быстро прекращается при выходе на морское или озерное побережье; «ландшафт-ное правило» – летние доминирующие шторма чаще всего возникают на склонах возвышенностей, окаймляющих речные долины, а затем их траек-тории сходятся к пониженной части рельефа. Очевидно, что метод траек-торий перспективен для локализации взаимодействующих с конвекцией квазиперманентных циркуляций пограничного слоя.

Концептуальная модель эволюции штормов (рис. 2 д). Замечено, что криволинейное движение доминирующих штормов в регионах развития горно-долинной и бризовой циркуляций (рис. 2 г) напоминает движение штормов вблизи стационарных зон конвергенции (рис. 2 д) – процесса, впервые объясненного в наших ранних работах [9,10]. Дело в том, что модель эволюции штормов, проходящих вблизи стационарных зон сходимости приземного ветра в погранслое (рис. 2д), которая объясняет видимые эффекты разделения, слияния, стационарирования локальных штормов и другие процессы вблизи таких зон, отражает процесс развития доминирующих элементов скоплений кучево-дождевой облачности масштаба большого мезо- $\beta$ , т.е. процесс того же пространственно-временного масштаба, который отображается при аккумуляции траекторий (рис. 2 г). Следует заметить, что концептуальная модель (рис. 2 д) и её модификации (зеркальное отражение в случае южного полушария) объясняет и предсказывает все типы мезоклиматических аномалий осадков, связанных с термомеханическими неоднородностями погранслоя, включая эффекты антропогенного влияния крупных городов на распределение конвективных явлений. Помимо этого она объясняет ряд прогностических правил, например, правило «двух третей»: в умеренных широтах северного полушария при типичном направлении трансляции  $V_m$  с юго-запада на северо-восток и типичном появлении новых элементов (Н) скопления справа от предыдущих зрелых (З) и диссипирующих (Д) и обходе шторма  $S_N$  севернее зоны конвергенции шторм «стационарирует», но направление развития его новых элементов сохраняется. Однако приближение такого же праводвижущегося шторма  $S_S$  с юга к зоне конвергенции может привести к возникновению групп новых ячеек с северной стороны шторма, что в моменты  $t_2$  и  $t_3$  будет восприниматься как деление и возникновение леводвижущегося шторма. В совокупности же мы получим, что на два (доминирующих) шторма с нормальным для северного (южного) полушария правым (левым) развитием появится один аномальный с левым или правым отклонением направления движения. При прогнозе нового развития, следует учитывать, что происхождение квазистационарной зоны сходимости приземного ветра не всегда «внешнее»: стационарные или малоподвижные линии конвергенции могут быть обусловлены предыдущим развитием конвективных штормов, например, оттоком холодного воздуха из-под шторма  $S_N$ .

Применение принципа иерархичности конвективных зон осадков к полям приземной конвергенции позволило нам найти порог [9, 10], начиная с которого приземная конвергенция существенно влияет на интенсивность зоны осадков большого масштаба мезо- $\beta$ , что может воздействовать на последовательность доминирования и форму скопления. Основные свойства скопления, такие как масштабы и периодичность появления элементов остаются без изменения.

Исследования траекторий штормов в неподвижной системе координат дополняет метод доминирующих скоплений (рис. 2 е). Метод доминирующих скоплений в различных вариантах применялся в [1, 3, 10, 12] и заключается в аккумуляции максимумов интенсивности в движущейся со скоростью трансляции системе координат и отображением главных максимумов интенсивности скоплений, соединенных направленными отрезками. Такие диаграммы (рис. 2 е) как бы указывают на распространение активной конвекции внутри воздушной массы. Длина таких траекторий  $S$  изменялась от 300 до 1000 км. Наряду со случаями относительно запутанных траекторий максимума (случаи 1, 6 и 8), как видим, многие МКС (2, 4, 9 и др.) имеют своеобразную «ось интенсивности», которая транслируется с воздушной массой. Другие (3, 7, 10) имеют некоторое «подобие» направленности (случаи 2–22 декабря 1995, 6–22 января 1996 и 10–29 января 1997, представлены на рис. 2 а, в). Если ввести простую меру «сложности траекторий в движущейся системе»: отношение между длиной отрезка  $\lambda$ , соединяющего концы ломаной кривой  $S$ , т.е. начальную и последнюю активные ячейки  $S_b$ , к длине траектории максимума  $S$ , то можно численно выразить степень линейности или простоты систем. Очевидно, что наиболее «простая» траектория когда  $\lambda/S=1$ . В рассмотренных нами случаях  $\lambda/S$  изменялась от 0,32 до 0,99, превышая 0,5 в 60 % случаев. Обнаружение скрытой линейной структуры «неорганизованных» систем дает основание для поиска факторов избранности того или иного направления развития скопления мезо- $\alpha$  и обосновывает векторный метод прогноза развития новых скоплений на промежуток времени до нескольких часов. Например, найденная закономерность уточняет времена появления штормов в схеме на рис. 2 д: при нормальном направлении развития систем в северном полушарии более южный доминирующий шторм появляется позднее, чем северный.

Заметим, что помимо описанных методов обоснования репрезентативности выборки, последовательного отбора доминирующих событий, поиске сигналов от иерархически соподчиненных мезомасштабных явлений и др. (рис.1 и рис.2), климатологические реконструкции жизненного цикла перспективны во многих областях естествознания. Так, в работе [4] систематизированы методы реконструкции применительно к природно-антропогенным системам. Среди прочего, эти методы позволяют обоснованно подходить к интерпретации численного моделирования неблагоприятных условий среды в условиях антропогенного изменения ландшафтов [13], оценке состояния [14] и прогнозированию геоэкологических систем [15]. Сущность этих методов раскрывается в динамических реконструкциях мезомасштабных конвективных систем и разработки алгоритмов краткосрочного прогноза опасных явлений изложенных во второй части доклада.



### Библиографический список

1. Абдуллаев, С.М. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: дис. ... д-ра геогр. наук / С.М. Абдуллаев. – М., Гидрометцентр РФ, 2010. – 407 с.
2. Lenskaia, O.Yu. Organization and evolution of mesoscale convective systems using radar data: objective description. The “dominating thunderstorm” conception and its application to MCS climatology. / O.Yu Lenskaia, S. M. Abdullaev, A.A. Zhelnin // Preprints, 15th Conf. on Mesoscale Proc., 2013, Portland, Oregon. – URL: <https://ams.confex.com/ams/15MESO/webprogram/Paper227607.html>.
3. Абдуллаев, С.М. Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем / С.М. Абдуллаев, А.А. Желнин, О.Ю. Ленская // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 5. – С. 34–45.
4. Абдуллаев, С.М. Жизненный цикл природно-антропогенных систем: концепция и методы исследования / С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская, Ю.А. Сапельцева // Вестник Воронежского Университета. Серия: География. Геоэкология. – 2013. – № 2. – С. 96–106.
5. Абдуллаев, С.М. Структура мезомасштабных конвективных систем в центральной России / С.М. Абдуллаев, А.А. Желнин, О.Ю. Ленская // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 1. – С. 20–32.
6. Абдуллаев, С.М. Эволюционная классификация мезомасштабных линий шквала / С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 3. – С. 24–32.
7. Ленская, О.Ю. Мезомасштабная организация и эволюция систем осадков на юге Бразилии: дис. ... канд. геогр. Наук / О.Ю. Ленская. – М., 2006. – 220 с.
8. Abdullaev, S.M. A Diagnostic and Forecasting Techniques Based on Radar Derived Translation and Propagation of Convective Systems / S.M. Abdullaev, O.Yu. Lenskaia // Preprints, 36th Conf. on Radar Meteorology, 2013. Breckenridge, CO, Amer. Meteor. Soc., 386. – 2013. – URL: <https://ams.confex.com/ams/36Radar/Paper228139.html>.
9. Абдуллаев, С.М. Стационарные зоны конвергенции приземного ветра масштаба мезо-β: пространственно-временные характеристики / С.М. Абдуллаев // Активное воздействие на атмосферные процессы в Молдове. – Кишинев, 1992. – Т. 3. – С. 122–135.
10. Абдуллаев, С.М. Эволюция и иерархия скоплений кучево-дождевой облачности: дис. ... канд. физ.-мат. наук / С.М. Абдуллаев. – М., Гидрометцентр РФ, 1992. – 206 с.
11. Абдуллаев, С.М. Влияние полей конвергенции приземного ветра на интенсивность осадков скоплений Cb / С.М. Абдуллаев, Н.С. Арская, А.А. Желнин // Метеорология и гидрология. – 1994. – №.8. – С. 33–37.
12. Abdoulaev S. Mesoscale precipitation systems in Rio Grande do Sul. Part 3: Structure and evolution of non-line mesoconvective systems / Abdoulaev, S., A. Starostin, O. Lenskaia // Brazilian Journal of Meteorology. – 2001. – V. 16. – n. 2. – Pp. 87–102.

13. Ленская, О.Ю. Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) / О.Ю. Ленская., С.М. Абдуллаев., А. И. Приказчиков., Д.Н. Соболев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 65–82.

14. Сапельцева, Ю.А. К вопросу о границах и экологической опасности природно-антропогенных систем / Ю.А. Сапельцева, С.М. Абдуллаев // Естественные и технические науки. – 2013. – № 1. – С. 149–152.

15. Гаязова, А.О. Прогнозирование численности *Microcystis Aeruginosa* на основе правил нечеткой логики и нечетких нейронных сетей / А.О. Гаязова, С.М. Абдуллаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». – 2012. – № 47 (306). – С. 5–11.