

7. Хворова Л.А., Гриценко А.А., Рудова Л.Н., Сукачева В.В. Некоторые вопросы моделирования процессов фотосинтеза, энерго- и массообмена в системе почва-растение-атмосфера // Материалы III краевой конф. по математике. – Барнаул, 2000. – С. 62–63.

8. Хворова Л.А., Журавлева В.В., Плинокосова Л.Н., Гриценко А.А. Результаты анализа и компьютерного тестирования блоков радиации и фотосинтеза // Известия АГУ. – 2001. – №1. – С. 61–65.

9. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 752 с.

УДК 51-76.57.036

## Проблемы моделирования фотосинтеза: анализ лимитирующих факторов и моделей

*В.В. Журавлева, В.В. Казазаев*

*АлтГУ, г. Барнаул*

**1. Анализ лимитирующих факторов.** Рост и развитие растений осуществляются за счет продуктов фотосинтеза. Это сложный процесс, включающий две основные стадии – световая (фотолиз) и темновая (цикл Кальвина у С3-растений, цикл Хэтча-Слэка-Карпилова у С4-растений и САМ-фотосинтез) [1]. Упрощенная схема, отражающая деление фотосинтеза на стадии и цикличность основных преобразований в этом процессе, показана на рисунке.

Для фотосинтеза характерно наличие нижнего порога освещенности, при котором он начинается. Первоначально увеличение интенсивности освещения приводит к пропорциональному усилению фотосинтеза (зона максимального эффекта). При дальнейшем увеличении фотосинтез возрастает медленнее и достигает области насыщения – плато [1].

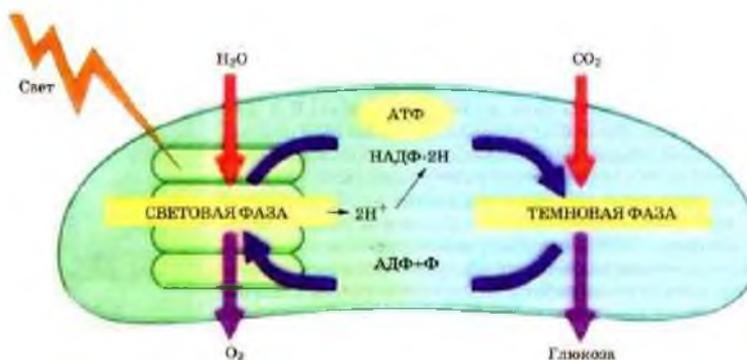


Рисунок – Упрощенная схема фотосинтеза

Влияние температуры на фотосинтез зависит от интенсивности освещения. При низкой освещенности фотосинтез лимитируется скоростью световых реакций и от температуры не зависит. При высокой освещенности скорость фотосинтеза определяется темновыми реакциями и влияние температуры проявляется отчетливо [1]. Низкотемпературный стресс влияет на фотосинтез прямо, уменьшая активность ферментов, и косвенно, за счет повреждения органелл. Оптимальная температура для большинства растений составляет 20–25°C. При температуре выше оптимальной интенсивность фотосинтеза резко падает (высокотемпературный стресс) [1].

Источником углерода для фотосинтеза является в основном CO<sub>2</sub> атмосферы (содержание в воздухе около 0,039%). Повышение содержания CO<sub>2</sub> до 1,5% вызывает прямо пропорциональное возрастание интенсивности фотосинтеза у зерновых культур. При увеличении содержания CO<sub>2</sub> до 15–20% процесс фотосинтеза выходит на плато, затем наступает депрессия. Повышенные и пониженные концентрации углекислого газа могут наблюдаться в естественных условиях в загущенном травостое или посеве сельскохозяйственных культур, где большую часть суток концентрация CO<sub>2</sub> может ограничивать интенсивность процессов фотосинтеза [1].

Кроме перечисленных лимитирующих факторов имеются и другие. На интенсивность фотосинтеза оказывают значительное влияние водный режим и режим минерального питания растений.

**2. Математические модели фотосинтеза.** В настоящее время актуальной является проблема прогнозирования изменения интенсивности фотосинтеза, связанного с повышением концентрации атмосферного углекислого газа и температуры. Соответствующие модели могут служить основой для прогноза последствий глобального изменения климата. Кроме того, построение модели фотосинтеза, описывающей адекватную реакцию растения на изменение основных факторов, является важной за-

дачей при построении имитационных моделей формирования биомассы растений и прогноза урожайности сельскохозяйственных культур [2–5].

Среди множества математических моделей фотосинтеза можно выделить три основных класса.

I класс – эмпирические зависимости [6]. Это световые и углекислотные кривые, описывающие зависимость интенсивности фотосинтеза от поглощенной фотосинтетически активной радиации и концентрации  $\text{CO}_2$ . Они не отражают влияния на скорость фотосинтеза других лимитирующих факторов. Применение таких моделей может привести к грубым ошибкам, особенно при моделировании не изолированного растения, а посева.

II класс – полуэмпирические модели [6–10]. Процесс фотосинтеза описывается как две последовательные стадии: диффузия молекул  $\text{CO}_2$  из воздуха к центрам карбоксилирования описывается законами биофизики, и биохимический цикл Кальвина – законами биохимии. Влияние ряда факторов внешней среды учитывается косвенно через диффузионные сопротивления. В современных комплексных прикладных моделях продуктивности растений реализована квазистатическая модель фотосинтеза (модель Рабиновича) или ее модификации [10]. Эти модели дают удовлетворительный результат в ограниченном диапазоне климатических условий и при оптимальном режиме минерального питания.

III класс – детальные модели фотосинтеза. Число параметров этих моделей так велико, что проведение их идентификации считается невыполнимой задачей и в динамических моделях продукционного процесса они не используются.

В работах [11–15] описана разработка «физиологичной» полуэмпирической модели фотосинтеза  $\text{C}_3$ -растений, которая включает описание: взаимодействия углекислого газа и кислорода с акцептором РибФ; «гликолатный» путь углерода; нелинейную кинетику синтеза РибФ; влияние концентрации азота в листьях растений. В работах [16–17] проведено исследование модели и показано, что в прикладных задачах прогноза урожайности (для однородного посева) она дает удовлетворительный результат.

Для указанной модели исследовано ее поведение в стрессовых по температуре условиях. Показана адекватность результатов. В дальнейшем планируется исследовать влияние других лимитирующих факторов, в том числе и их комбинаций.

#### Библиографический список

1. Дмитриева Г.А. Физиология растений – М.: Высшая школа, 2005. – 736 с.
2. Хворова Л.А., Топаж А.Г. Динамическое моделирование и прогнозирование в агрометеорологии. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2010. – 263 с.
3. Хворова Л.А., Топаж А.Г. Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб, 2011. – Т.1. №115. – С. 99–105.
4. Хворова Л.А., Брыксин В.М., Гавриловская Н.В., Топаж А.Г. Математическое моделирование и информационные технологии в экологии и природопользовании. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. – 277 с.
5. Журавлева В.В. Математические модели процессов регуляции в физиологии растений // Известия АГУ. – Барнаул, 2008. – №1(57). – С. 43–57.
6. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 223 с.
7. Лайск А.Х. Кинетика фотосинтеза  $\text{C}_3$ -растений. – М.: Наука, 1991. – 261 с.
8. Penning de Vries F.W.T., Van Laar H.H. Simulation of plant growth and crop production. – Wageningen: Pudoc, 1982. – 308 p.
9. De Wit C.T. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. – Wageningen: Pudoc, 1978. – 140 p.
10. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. – 396 с.
11. Гриценко А.А., Журавлева В.В., Плинокосова Л.Н., Хворова Л.А. Результаты анализа и компьютерного тестирования блоков радиации и фотосинтеза // Известия АГУ. – Барнаул, 2001. – №1(19). – С. 61–64.
12. Журавлева В.В. Математическая модель дыхания  $\text{C}_3$ -растений во время фотосинтеза // Известия АГУ. – Барнаул, 2007. – №1(53). – С. 45–49.
13. Журавлева В.В. Математическая модель фотосинтеза и фотодыхания  $\text{C}_3$ -растений // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т. 15, вып. 3. – С. 470–473.
14. Журавлева В.В. Моделирование влияния азотного дефицита на процесс фотосинтеза // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2008. – Т. 15, вып. 4. – С. 666.
15. Журавлева В.В. Математическое моделирование процессов накопления биомассы  $\text{C}_3$ -растений в процессе вегетации: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Барнаул. – 2008. – 120 с.
16. Журавлева В.В. Качественный анализ модели фотосинтеза и фотодыхания  $\text{C}_3$ -растений // Известия АГУ. – Барнаул, 2009. – №1(61). – С. 56–59.

УДК 551.578

**Динамико-стохастическое моделирование поверхностного стока***Т.Н. Корбут, А.В. Глебова**ГАГУ, г. Горно-Алтайск*

Задача, решения прогнозирования повышения уровня вод в реках Республики Алтай является одной из приоритетных, в связи с меняющимися климатическими условиями. Формирование поверхностного стока, который большое влияние оказывает на уровень рек республики из-за физико-географических (рельеф) особенностей, зависит от большого числа процессов и параметров. Перспективной исследования взаимосвязи всех параметров связаны с применением динамико-стохастических моделей со случайными «входами», учитывающими вероятностную природу метеорологических процессов и физические (детерминистические) механизмы формирования поверхностного стока [1, 2].

Применение динамико-стохастических моделей является динамично развивающимся направлением. Для повышения надежности физико-математических моделей формирования стока связывают с возможностями насыщения их более подробной детерминистической информацией: уточнением описания отдельных гидрологических процессов с учетом ранее неизвестных или недооцениваемых физических механизмов, включением новых экспериментально установленных связей между гидрологическими переменными, между параметрами модели и характеристиками водосбора, а учет различных источников неопределенности, присутствующих в детерминистической модели, достигается включением в нее соответствующей стохастической информации. Поэтому, для вероятностных оценок характеристик возможных гидрографов стока одним из наиболее перспективных подходов является использование динамико-стохастических моделей формирования речного стока, где на входе физико-математических моделей формирования стока используются стохастические модели метеорологических воздействий на водосбор [3]. Для разработки динамико-стохастической моделей формирования стока возможно использование таких метеорологических параметров как среднесуточные, значения температуры и относительной влажности воздуха, суточные суммы осадков, толщина снега [1].

В связи со сложным рельефом местности актуальной задачей является также рассмотреть применение данных дистанционного зондирования Земли [4] в построении динамико-стохастической модели формирования стока.

**Библиографический список**

1. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России // Лед и снег. – 2014. – №2.
2. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование процессов гидрологического цикла речного бассейна. М. : Наука, 2007. – 280 с.
3. Кучмент Л.С. [и др.] Совершенствование научно-методической базы расчетов и прогнозов речного стока на основе физико-математических моделей его формирования // VII Всероссийский съезд, 2013.
4. Использование спутниковой информации о характеристиках снежного покрова в физико-математической модели формирования весеннего половодья / Л.С. Кучмент [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2010. – №2. – 167 с.

УДК 551.515.4

**К вопросу о выборе параметров алгоритма DBSCAN при кластеризации данных о грозовой активности***С.Ю. Кречетова<sup>1</sup>, М.Ю. Беликова<sup>1</sup>, А.А. Перельгин<sup>2</sup>, А.В. Глебова<sup>1</sup>**<sup>1</sup>ГАГУ, г. Горно-Алтайск; <sup>2</sup>АлтГУ, г. Барнаул*

Актуальность исследования заключается в том, что решение задачи кластеризации данных о грозовых разрядах, регистрируемых Всемирной сетью локализации молний WWLLN (World Wide Lightning Location Network), может быть использовано для оценки пространственного распределения