

даря его компонентной структуре и отличной поддержке кэширования, он особенно подходит для разработки сложных проектов. На данный момент этот фреймворк является одним из лидеров по совокупности своих характеристик и имеет большое сообщество.

Библиографический список

1. Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.А., Савкин В.М., Кусковский В.С. Управление состоянием берегов водохранилищ. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 239 с.
2. Хабидов А.Ш., Марусин К.В., Федорова Е.А., Хомчановский А.Л., Лыгин А.А., Лыгин Ан.А. Организация мониторинга береговой зоны и дна Новосибирского водохранилища // Известия АГУ. – Барнаул. 2012. – № 3/1(75). – С. 142–146.
3. Марусин К.В. Журавлева В.В., Грищенко Д.В. Методы прогнозирования переработки побережья водохранилищ // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования: сб. науч. ст. междунар. конф. Барнаул, 11–14 ноября, 2014. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2014. – С. 364–372.
4. Грищенко Д. В., Ефремов И. А. Применение метода Качугина для прогнозирования переработки побережья водохранилищ // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования: сб. науч. ст. междунар. конф. Барнаул, 20–24 октября, 2015. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2015. – С. 636–641.
5. Журавлева В.В., Дьякова Т.В. Исследование повторяемости ветров на Новосибирском водохранилище // Известия АГУ. – Барнаул, 2012. – №1-2(73). – С. 82–83.
6. Журавлева В.В., Дьякова Т.В. Анализ морфодинамики береговой линии Новосибирского водохранилища // МАК-2014: сборник трудов семнадцатой региональной конференции по математике. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2014. – С. 115–117.
7. Журавлева В.В., Дьякова Т.В. Исследование динамики потока наносов на береговой линии Новосибирского водохранилища // Известия АГУ. 2014. – №1-2(81). – С. 101–107.
8. CSS Flexible Box Layout Module Level 1. W3C Candidate Recommendation, 26 May 2016. URL: <https://www.w3.org/TR/css-flexbox-1/>.
9. Canvas (HTML). Статья в Википедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Canvas_\(HTML\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Canvas_(HTML)).
10. Gulpjs. Automate and enhance your workflow. URL: <http://gulpjs.com/>.
11. LibSass. URL: <http://sass-lang.com/libsass>.
12. URL: <https://github.com/postcss/autoprefixer>.
13. URL: <http://php.net/>.
14. URL: <http://www.yiiframework.com/>.

УДК 004.9

Разработка программного модуля радиационного режима атмосферы в среде AnyLogic

О.А. Ефремова
АлтГУ, г. Барнаул

Одной из наиболее продвинутых областей в математической экологии является моделирование продукционного процесса растений [1]. Это определяется практической значимостью таких моделей для оптимизации агрокультуры и тепличного хозяйства. Здесь математические модели используются для выбора оптимальной стратегии проведения сельскохозяйственных мероприятий: орошения, полива, внесения удобрений, выбора сроков посева или посадки растений с целью получения максимального урожая [2–4].

Начало математическому моделированию продукционного процесса растений относят к 1953 г., когда появилась работа японских ученых Монси и Саэки, в которой впервые построена модель фотосинтеза в растительном покрове в зависимости от радиации, относительной площади листьев и их ориентации.

В Советском Союзе работы по ММПП были начаты по инициативе Ничипоровича (1956 г). В институте астрофизики и физики атмосферы Академии Наук Эстонии Россом и Бихеле (1964 г) была разработана математическая модель посева, в которой детально рассмотрено влияние радиационного режима и ориентации листьев на фотосинтез и продуктивность растительного покрова [5]. Начиная с 1974 г. начинают разрабатываться модели на базе ЭВМ, например, модель ELCROS. Так же начинают разрабатываться динамические модели для отдельных культур: модель SIMED для люцерны, модель SUBGRO для сахарной свеклы и др.

Важнейшей частью многих моделей роста растений и посева является взаимодействие системы со световым климатом. Способ такого взаимодействия определяет интенсивность радиации, прихо-

дующей на каждую часть поверхности растения или посева, и это в свою очередь через фотосинтез может оказывать сильное действие на скорость и характер роста [6–8].

В метеорологии принято выделять коротковолновую и длинноволновую радиацию. Солнечная радиация на 99% является коротковолновой. Она включает, кроме видимого света, еще ближайшую к нему по длинам волн ультрафиолетовую и инфракрасную радиацию. Видимый свет занимает узкий интервал длин волн всего от 380 до 780 нм. Однако в этом интервале заключается почти половина всей лучистой энергии Солнца (47%). Почти столько же приходится на инфракрасные лучи (46%) и всего 7% – на ультрафиолетовые [9].

Поток прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность чаще всего называют инсоляцией. Этот поток зависит от угла падения лучей на горизонтальную поверхность. С изменением угла падения, т.е. высоты солнца над горизонтом, изменяется и интенсивность солнечной радиации. Для расчета инсоляции используют следующее соотношение:

$$S' = S_0 \cdot \sin h_0,$$

$$\sin h_0 = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \left(\frac{2\pi \cdot (T+12)}{24} \right),$$

где $S_0 = 1370 \text{ Вт/м}^2$, h_0 – высота Солнца над горизонтом, град.; φ – географическая широта места наблюдения, град.; δ – угол склонения Солнца, град.; T – время суток, час. Склонение Солнца в свою очередь вычисляется по формуле:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(\frac{360 \cdot (d-81)}{365} \right),$$

в которой d – порядковый номер дня года.

Прежде чем достигнуть поверхности земли, солнечная радиация проходит через промежуточный слой – земную атмосферу, где она ослабляется за счет поглощения и рассеяния. Атмосферой поглощается относительно небольшое количество солнечной радиации, примерно 17–25%. Более значительно радиация ослабляется путем рассеяния. Если при поглощении лучистая энергия задерживается атмосферой, то в процессе рассеяния радиация меняет направление и приходит в виде излучения со всех участков небесного свода. Поток рассеянной солнечной радиации при безоблачном небе на горизонтальную поверхность определяется по формуле:

$$D = \frac{1}{3} \left(S_0 - \frac{S_0 \sin h_0}{\sin h_0 + c} \right) \sin h_0,$$

в которой c – степень прозрачности атмосферы. Значения коэффициента c можно определить из таблицы 1.

Таблица 1 – Степень прозрачности атмосферы

	Степень прозрачности атмосферы						
	Идеальная	Высокая	Повышенная	Нормальная	Пониженная	Низкая	Сверхнизкая
c	0,13	0,27	0,34	0,43	0,54	0,67	0,91

При безоблачном небе поток рассеянной радиации составляет около 10% инсоляции. Наличие облаков резко увеличивает поток рассеянной радиации.

Прямая и рассеянная солнечная энергия у земной поверхности наблюдаются всегда вместе и создают поток суммарной радиации:

$$Q = S' + D.$$

При безоблачном небе суммарная радиация зависит от широты места, склонения и высоты Солнца, от оптических свойств атмосферы и альбедо земной поверхности. Аналитически связь суммарной радиации с высотой Солнца часто представляют в виде:

$$Q_0 = \frac{S_0 \cdot \sin h_0}{1 + f \cdot \operatorname{cosec} h_0}.$$

Величина параметра f определяется географической широтой и временем года; обычно, в течение года он изменяется от 0.06–0.07 в январе–декабре, до 0.20–0.23 в мае–августе месяцев.

На поток суммарной радиации облачность оказывает столь же существенное влияние, как и на потоки прямой и рассеянной радиации. Зависимость потока суммарной радиации от количества облачности описывают формулой:

$$Q = Q_0 (1 - f \cdot n),$$

где Q_0 – плотность потока суммарной радиации при безоблачном небе, n – количество облаков, в долях единицы, коэффициент f зависит от широты φ и принимает следующие значения (таблица 2):

Таблица 2 – Значения коэффициента f

φ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	75°	80°	85°
f	0,65	0,66	0,67	0,68	0,67	0,64	0,60	0,50	0,45	—	—

Степень ослабления суммарной радиации облаками удобно оценивать безразмерной величиной – функцией ослабления – P :

$$P = 1 - \frac{Q}{Q_0},$$

где Q_0 – поток при безоблачном небе, Q – радиация при сплошной облачности.

Реализация модели радиационного режима была осуществлена в среде имитационного моделирования AnyLogic. Основными параметрами, влияющими на интенсивность прямой солнечной радиации, являются продолжительность дня и угол склонения Солнца. Значение угла склонения Солнца претерпевает сезонные изменения, он принимает значения от 23.45° до -23.45° и становится равным нулю два раза в год: в дни весеннего и осеннего равноденствия.

От угла склонения Солнца и от широты местности, для которой производятся расчеты, зависит продолжительность дня. В среднем погрешность (отклонения расчетной и фактической продолжительности дня на 15-е число каждого месяца) составила 16 минут.

Основные закономерности изменения потоков радиации определяются высотой Солнца, прозрачностью атмосферы, облачностью, продолжительностью солнечного сияния и некоторыми другими факторами. На рисунке приведены средние расчетные значения суммарной радиации в отсутствие облачности. Погрешность не превосходит 18 Вт/м². Из графика видно, что при безоблачном небе суммарная радиация имеет простой суточный ход с максимумом около полудня.

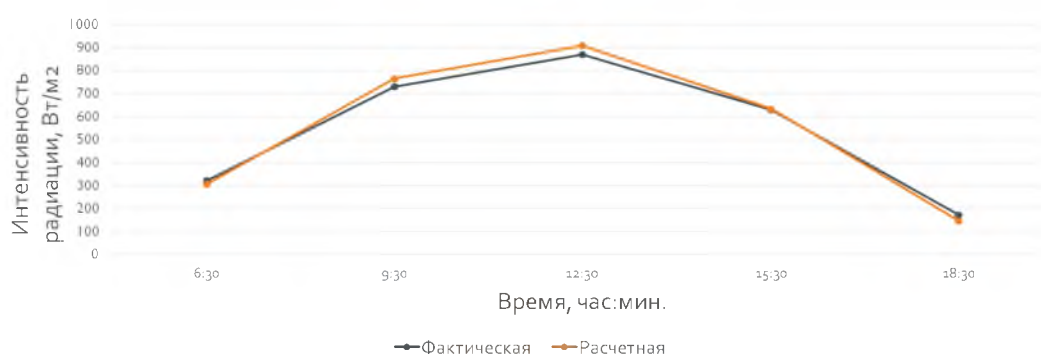


Рисунок – Средние расчетные значения суммарной радиации в отсутствие облачности

При тех же условиях получены средние значения рассеянной радиации. Максимальная погрешность составила 38,5 Вт/м². Рассеянная радиация так же, как и суммарная, имеет хорошо выраженный суточный ход: интенсивность излучения возрастает от восхода солнца до полудня, а затем уменьшается до захода солнца.

Библиографический список

1. Хворова Л.А., Брыксин В.М., Гавриловская Н.В., Топаж А.Г. Математическое моделирование и информационные технологии в экологии и природопользовании. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2013. – 277 с.
2. Хворова Л.А., Брыксин В.М., Гавриловская Н.В. Использование информационных технологий при прогнозировании урожайности зерновых культур // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – №5 (86). – С. 23–30.
3. Хворова Л.А., Брыксин В.М., Скобова Т.С. Моделирование теплового режима почвы с учетом приходящей длинноволновой радиации // Известия АГУ. – 2005. – №1. – С. 74–77.
4. Хворова Л.А. Идентификация параметров модели фенологического развития зерновых культур в условиях Алтайского края // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2010. – Т. 17, вып. 3. – С. 470–472.
5. Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 224 с.
6. Гриценко А.А., Рудова Л.Н., Сукачева В.В., Хворова Л.А. Моделирование радиационного режима // Известия АГУ. – 1999. – № 1 (11). – С. 36–39.

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].

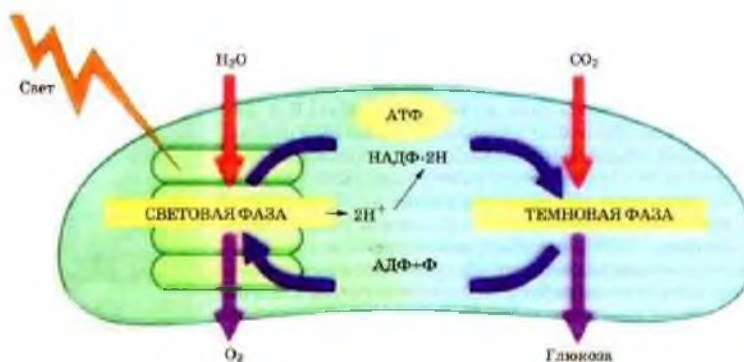


Рисунок – Упрощенная схема фотосинтеза

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 CO₂ атмосферы (содержание в воздухе около 0,039%). Повышение содержания CO₂ до 1,5% вызывает прямо пропорциональное возрастание интенсивности фотосинтеза у зерновых культур. При увеличении содержания CO₂ 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 CO₂ 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-