

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛУГОВОЙ И СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

*А.Н. Полевой\**, *Л.Е. Божко*, *Е.А. Барсукова*

Одесский государственный экологический университет,  
Украина, 65016, Одесса, ул. Львовская д. 15; \**apolevoy@te.net.ua*

**Реферат.** В работе представлена характеристика агроклиматических условий формирования продуктивности луговой и степной растительности в условиях изменения климата на период до 2050 года. Оценка выполнена путем сравнения средних многолетних агроклиматических показателей (1980–2010 гг.) продуктивности природных фитоценозов в Степной зоне Украины с такими же показателями на будущее по десятилетиям для трех периодов времени: 2021–2030, 2031–2040 и 2041–2050 гг. Расчеты изменений климата выполнялись по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 для трех агроэкологических категорий урожайности: потенциальной, метеорологически возможной и действительно возможной. Изменение климатических условий приведет к повышению продуктивности трав. Более высоким оно будет в Северной Степи (на 17–46% по сравнению со средними многолетними значениями) и меньшим – в Южной Степи (на 8–38%). Также произойдет изменение баланса содержания органического углерода в почве. По обоим рассматриваемым сценариям баланс органического углерода на участках луговой и степной растительности ожидается положительным.

**Ключевые слова.** Изменение климата, луговая растительность, степная растительность, продуктивность, фотосинтез, площадь листьев, фотосинтетический потенциал, урожай, почва, органический углерод.

### Введение

В Украине в результате интенсивного сельскохозяйственного использования земель степная растительность в естественном виде к настоящему времени сохранилась только на склонах балок, массивах со сложным рельефом, в заповедниках, на территории бывших военных полигонов, а также в предгорьях, на песчаных косах Азово-Черноморского побережья и островах. Участки целинных степей охраняются в заповедниках и заказниках.

В типичной степной зоне на севере распространена разнотравно-типчаково-ковыльная растительность на обычных черноземах, на юге – типчаково-ковыльная на черноземах южных и темно-каштановых почвах, вдоль Азово-Черноморского побережья – полынно-злаковая растительность на каштановых солончаковых почвах (Конопля и др., 2001; Кондратюк, Чуприна, 1992; Шищенко, 1985, 2000).

Современное состояние фитоценозов, которые представляют фиторазнообразие степной и луговой растительности, свидетельствует об их высокой

способности к устойчивому и долговременному существованию, но под воздействием антропогенных факторов разнообразие растительного мира уменьшается, что приобретает актуальность как на мировом, так и на региональном уровнях (Базилевич, 1993; Титлянова и др., 1993; Билик, 1972; Романова, 1997).

Важным вопросом современных проблем сохранения биомногообразия, рационального использования растительных ресурсов и оптимизации их состояния в условиях глобального потепления является сохранение существующих растений и обогащение их ассортимента культурами, которые были бы приспособлены к экстремальным факторам изменения агроклиматических показателей (Оцінка впливу кліматичних змін..., 2011; Кліматичні зміни..., 2015; Проблемы ландшафтного..., 2000; Romkin, Savchenko, 2016).

В конце прошлого и в начале текущего века отмечаются значительные изменения климатических условий на всем Земном шаре из-за потепления. Под воздействием изменения климата изменяются агроклиматические условия роста и формирования продуктивности как сельскохозяйственных культур, так и природных фитоценозов. Для обоснования оптимальных схем природопользования и сохранения дикорастущих фитоценозов степных и луговых территорий необходима оценка их продуктивности в условиях изменений климата.

Целью работы является оценка формирования продуктивности луговой и степной растительности и баланс органического углерода в почве в условиях изменений климата.

### **Состояние проблемы**

Продуктивность дикорастущих фитоценозов лугов и степей (это сравнительно молодое направление биологических и географических наук, которое получило развитие в связи с Международной биологической программой (МБП). Результатом работы МБП есть большое количество исследований продукционного процесса в целом, а также первичной продуктивности экосистем разных географических зон (Базилевич, 1993; Титлянова, 1993; Шищенко, 1985, 2000).

Биологическая продуктивность луговой и степной растительности представляет собой способность живого вещества создавать биомассу и образовывать биотический покров. Она формируется под воздействием целого ряда факторов, одним из которых является климат.

Вопросом исследования параметров запасов фитомассы, которая формируется в течение года, их количественной оценки посвящены работы (Парахин и др., 2006; Танфильев, 1975; Чибилев, 1990).

В них обобщен весь фактический материал первичной продуктивности экосистем Северной Евразии в пределах территории бывшего СССР. Установлено, что биомасса растений в степи составляет от 100 до 400 ц/га. Помимо этого, также установлено, что для растительности степей соотношения между живыми и отмершими органами представляет около 65% на черноземах и

---

темно-каштановых почвах и 35% на каштановых почвах. В работе (Білик и др., 1972) приводится характеристика современного состояния растений в заповеднике «Михайловская целина» и обращается внимание на то, что в результате антропогенного влияния перечень трав сокращается, некоторые виды исчезают и основная задача человечества на данном этапе – сохранить степные экосистемы (Білик и др., 1972). Исследования (Танфильева, 1975) касаются долголетия многих трав, а работы (Білик и др., 1972; Чибилева, 1990) посвящены исследованиям сукцессии и степного круговорота степных трав.

Ценность степной растительности для кормопроизводства рассматривалась в работах (Білик и др., 1972; Танфильев, 1975; Чибилев, 1990). В работах (Парахин и др., 2006; Проблемы ландшафтного..., 2000; Romkin et al., 2016) изложенные основы лугового и степного кормопроизводства, рассматривается вопрос ресурсосберегающих технологий создания высокопроизводительных сенокосов и пастбищ. Особенное внимание уделено основам получения качественных семян трав. Исследования влияния климатических и погодных условий на развитие степной и луговой растительности и формирование их продуктивности в Украине немногочисленны (Romkin et al., 2016).

Широкому кругу проблем влияния климатических изменений на естественную растительность, адаптации к этим изменениям и смягчения последствий этого влияния, посвящена работа (Hopkins, Del Prado, 2007). Оценка повышения продуктивности трав в Европе при реализации климатического сценария SRES A1B REMO + ECHAM5 предполагается с использованием модели ORCHIDEE-GM v2.2 за счет учета изменений климата и повышения концентрации  $\text{CO}_2$  (Chang et al., 2017). Полагается, что повышение концентрации  $\text{CO}_2$  повысит уровень интенсивности фотосинтеза, площади листовой поверхности (LAI), понизит устьичное сопротивление. Это уменьшит расходы влаги на транспирацию, повысит эффективность использования влаги и, в конечном итоге, в экосистеме это приведет к повышению продуктивности трав.

Полученные с помощью модели оценки предполагают более раннее начало вегетации трав и увеличение ее продолжительности. В работах (Richardson et al., 2013; Reyer et al., 2013; Johansson et al., 2013) отмечается высокая чувствительность фенологии растений к изменениям климата.

Климатические изменения, ассоциируемые с эмиссией парниковых газов, имеют большое значение для трав Европы (Hopkins, Del Prado, 2007). Проектируемые сценарии показывают, что повышение температуры воздуха и концентрации  $\text{CO}_2$  благоприятствуют росту трав, в особенности бобовых, но изменение сезонного количества осадков снижает продуктивность трав. В дальнейшем рост трав связан с увеличением частоты засух и другими экстремальными явлениями. Наряду с изменением климата в Центральной Европе, ожидается увеличение рисков засушливых условий (Burri et al., 2014), приводящих к снижению продуктивности трав. В работе (Ciais et al., 2005) дается оценка снижения первичной продуктивности трав в Восточной и Западной Европе в связи с засушливыми условиями 2003 года. В условиях Австрии (Fuchslueger et al., 2016) засушливые условия снижают продуктивность трав.

Ожидается (Jacob et al., 2014) увеличение количества осадков в Северной и Центральной Европе и уменьшение в Южной Европе, региональное прогнозирование предполагает более засушливые условия в Южной Европе и более влажные в Северной Европе. В работе (Van Oijen et al., 2014) с помощью трех моделей вегетации (JSBACH, LPJmL, ORCHIDEE) и трех моделей специфических экосистем (BASFOR, EPIC, PASIM) дается вероятностная оценка засушливых явлений в Европе, сравниваются два периода: 1971–2000 и 2071–2100 годы. В качестве критерия оценки засушливости используется индекс SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index). Отмечается увеличение риска проявления засухи, особенно в Средиземноморье.

В условиях Ирландии проводилась оценка потенциальной продуктивности трав на ближайший 100-летний период (Holden, Brereton, 2002). Ожидается понижение продуктивности трав в восточной части страны из-за летней засушливости и повышение продуктивности в западной части страны. В исследовании (Aiming et al., 2018) получены оценки ожидаемой продуктивности трав в условиях Великобритании: предполагается повышение продуктивности трав от 12.5 до 15.5 т га<sup>-1</sup> к 2050 году.

В работе (Leitinger et al., 2015) отмечается, что в двух различных регионах Альп при засухе снижается влажность почвы под травянистой растительностью. В условиях Швейцарии (Gilgen, Buchmann, 2009) ожидается к 2070 году уменьшение годового количества осадков на 20%, что вызовет снижение продуктивности растительности. Установлена прямая связь между продуктивностью растительности и годовым количеством осадков.

В условиях стран Балтии выполнены разноплановые фундаментальные исследования по изменению климата, также рассматривается оценка продуктивности растений при климатических изменениях (Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin, 2008).

## **Материалы и методы исследований**

Климатические изменения на будущее рассчитываются с использованием климатических моделей. Глобальные климатические модели являются основными инструментами, которые используются для проектирования длительности и интенсивности изменений климата в будущем. При этом используются климатические модели разных уровней сложности, от простых климатических моделей к моделям переходной сложности, полных климатических моделей и моделей всей Земной климатической системы. Эти модели рассчитывают будущие климатические режимы на основе ряда сценариев изменения антропогенных факторов (Оцінка впливу кліматичних змін..., 2011; Кліматичні зміни..., 2015; Кліматичні ризики..., 2018).

В данном исследовании для климатических расчетов используется набор сценариев, а именно Репрезентативные траектории концентраций (Representative Concentration Pathways – RCP), которые представляют собой четыре сценария, включающие временные ряды выбросов и концентраций всего набора парниковых газов, аэрозолей и химически активных газов (Клі-

---

матичні ризики..., 2018). Наиболее исследованными сценариями климата будущего считаются два из них: RCP4.5 и RCP8.5. В работе (Кліматичні ризики..., 2018) предложено для условий Украины ожидаемое распределение температуры и осадков согласно сценариям выбросов по RCP4.5 и RCP8.5 в течение периода 2021–2050 гг., которое было положено в основу нашего исследования.

Анализ влияния изменений климата на режим агроклиматических показателей развития и формирования продуктивности луговых и степных фитоценозов выполнялся путем сравнения средних многолетних величин (за период 1980–2010 гг.) и величин, рассчитанных по климатическим сценариями RCP4.5 и RCP8.5 по десятилетиям: 2021–2030 гг. (первый период), 2031–2040 гг. (второй период), 2041–2050 гг. (третий период).

При этом использовались наблюдения за ростом и развитием трав, которые распространены преимущественно в Степи Украины. Это разнотравные злаки: тонконог луговой (*Poa pratensis* L.), костер бороздчатый или типчак и костер валесский (*F. valesiaca*), кипец гребенчатый (*Koeleria cristata*), а также житняк гребенчатый (*Agropyron pectinatum*), тонконог узколистный, тимофеевка степная (*Phleum phleoides*) и некоторые виды других дикорастущих трав.

Для оценки условий вегетации рассматривались: длительность периода начало вегетации – цветение трав, средняя температура за этот период, сумма осадков, суммарное испарение, испаряемость, гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК), относительная влагообеспеченность, сумма фотосинтетически-активной радиации (ФАР).

Для детализации исследования Степная зона Украины была поделена на 2 подзоны: Северная Степь и Южная Степь.

Расчеты продуктивности трав выполнялись с помощью базовой модели оценки агроклиматических ресурсов формирования продуктивности сельскохозяйственных культур (Полевой, 2004), в основе которой лежит сформулированная в работе (Тооминг, 1984) концепция максимальной продуктивности посевов. Расчеты выполнялись по трем агроэкологическим категориям урожайности: потенциальной урожайности (ПУ), которая при оптимальной обеспеченности растений теплом, влагой и минеральным питанием определяется поступлениям солнечной радиации; метеорологически возможной урожайности (МВУ), уровень которой ограничивается температурным режимом и режимом увлажнения; действительно возможной урожайности (ДВУ) определяемой естественным плодородием почвы (Полевой, 2004).

Суммарный баланс содержания органического углерода в почве определяется по методу (Образцов, 1990).

## Основные результаты исследования

**Северная Степь.** По средним многолетним данным сезонное развитие трав начинается в конце марта. По сценарию изменения климата RCP4.5 оно будет начинаться в начале апреля во всех трех расчетных периодах. По сценарию изменения климата RCP8.5 сезонное развитие трав начнется в первый сценар-

ный период на 10 дней позже средних многолетних сроков (табл. 1), во второй расчетный период оно начнется на 6 дней позже, а в третий период ожидается, что начало вегетации почти совпадет со средним многолетним сроком.

За период начало вегетации – цветение трав поступление ФАР по средним многолетним данным составляет  $51.6 \text{ кДж см}^{-2}$ . Расчеты по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 показали, что поступление ФАР в первый расчетный период будет увеличиваться и составит соответственно 136 и 114% от средней многолетней величины. В 2031–2040 гг. поступление ФАР ожидается еще на более высоком уровне, особенно по сценарию RCP4.5, и будет составлять соответственно 142 и 130% от средней величины. В третий расчетный период поступление ФАР по сценарию RCP4.5 будет выше на 28% от средней многолетней величины, а по сценарию RCP8.5 – выше на 18% от многолетней величины.

ПУ всей сухой массы трав при средних многолетних условиях составляет  $465 \text{ ц га}^{-1}$ . По климатическому сценарию RCP4.5 соответственно при увеличении прихода ФАР значительно вырастет и ожидаемая величина ПУ.

**Таблица 1.** Агрометеорологические условия вегетации трав Северной Степи при средних многолетних условиях и в условиях изменения климата (за период начало вегетации – цветение трав)

Период, годы	Дата начала вегетации	Средняя температура воздуха, °С	Сумма осадков, мм	Суммарное испарение (E), мм	Испаряемость ( $E_0$ ), мм	Относительная влагообеспеченность ( $E/E_0$ ), отн. ед.	Средний ГТК, отн. ед.	Сумма ФАР, $\text{кДж см}^{-2}$
1980–2010	27.03	13.1	83	98	189	0.52	0.89	51.6
RCP4.5								
2021–2030	2.04	12.5	93	109	193	0.56	0.93	73.4
2031–2040	4.04	12.1	117	120	173	0.69	1.46	70.0
2041–2050	4.04	13.1	83	99	201	0.49	0.85	66.0
RCP8.5								
2021–2030	8.04	14.1	78	97	179	0.54	0.92	58.9
2031–2040	2.04	12.8	98	112	192	0.58	0.90	67.1
2041–2050	29.03	12.7	107	110	154	0.72	1.24	61.0

В течение всех сценарных периодов она будет превышать на 24–48% среднюю многолетнюю величину, при этом наибольшая величина ПУ ожидается в первый расчетный период. По сценарию RCP8.5 ПУ всей сухой массы также на протяжении всех расчетных периодов будет выше средней многолетней величины, но ниже, чем ожидаемая по сценарию RCP4.5 и составит 120–130% от средней многолетней величины (табл. 2).

Средняя за рассматриваемый период вегетации трав температура воздуха по средним многолетним данным составляла  $13.1^\circ\text{C}$ . В случае реализации сценария RCP4.5 в два первых периода средняя температура ожидается ниже средней многолетней ( $12.1\text{--}12.5^\circ\text{C}$ ). В третий период она будет равна средней многолетней. По сценарию RCP8.5 средняя температура воздуха в первый

период будет на 1°C выше среднегодовой, во второй и третий периоды на 0.3–0.4°C ниже.

**Таблица 2.** Формирование урожая трав Северной Степи при средних многолетних условиях и в условиях изменения климата

Период, годы	Вся сухая масса, ц га <sup>-1</sup>			Фотосинтетический потенциал, м <sup>2</sup> м <sup>-2</sup>	Урожай трав при их влажности 16% , т га <sup>-1</sup>			Баланс органического углерода в почве, т С га <sup>-1</sup>
	потенциального урожая	метеорологически возможного урожая	действительно возможного урожая		надземной массы	подземной массы	общей массы	
1980–2010	465	218	150	73.2	3.5	13.9	17.4	0.105
RCP4.5								
2021–2030	689	303	209	100.4	4.9	19.4	24.3	0.146
2031–2040	667	318	219	119.5	5.1	20.4	25.5	0.153
2041–2050	575	256	177	81.2	4.1	16.4	20.5	0.123
RCP8.5								
2021–2030	605	265	183	87.5	4.2	16.9	21.2	0.128
2031–2040	569	276	190	92.9	4.5	17.9	22.4	0.135
2041–2050	556	312	215	105.4	5.0	20.0	25.0	0.150

По климатическому сценарию RCP4.5 ожидается увеличение сумм осадков в первый период на 12%, и значительно больше во второй период – на 41% по сравнению с многолетним значением. Количество осадков в третий период ожидается на уровне среднего многолетнего. Дефицит влаги ( $E_0 - E$ ) в первый период несколько снизится от 91 до 84 мм, незначительно повысится влагообеспеченность от 0.52 до 0.56 отн. ед. Также незначительно вырастет величина ГТК, которая, тем не менее, характеризует период как засушливый (см. табл. 1).

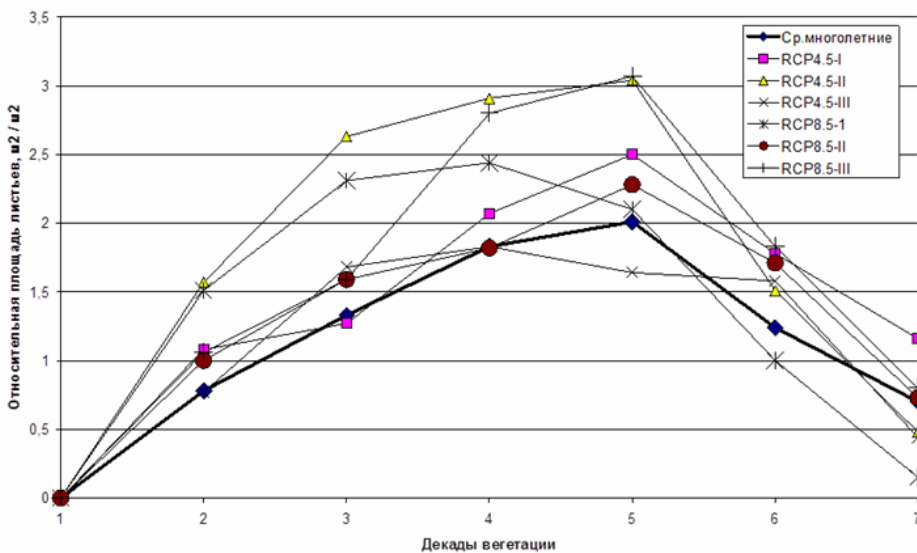
Во втором периоде за счет увеличения количества осадков и снижения температур воздуха возможно существенное уменьшение дефицита влаги до 53 мм, что значительно улучшит влагообеспеченность и повысит ГТК до 1.46 отн. ед. Третий период будет характеризоваться как засушливый (ГТК = 0.85): увеличится дефицит влаги до 102 мм и ухудшится влагообеспеченность до 0.49 отн. ед.

По сценарию RCP8.5 сумма осадков за рассматриваемый период вегетации трав будет увеличиваться от одного сценарного периода к другому. В первый сценарный период ожидается, что количество осадков будет несколько ниже многолетней величины (94%). Для второго периода ожидается рост суммы осадков на 18%. Увеличение количества осадков в третий период ожидается на 29% выше среднегодовой величины (табл. 1). Дефицит влаги во второй период снизится от 91 до 80 мм. Произойдет незначительное повышение влагообеспеченности от 0.54 до 0.58 отн. ед. и увеличение величины ГТК, который, тем не менее, характеризует эти периоды как засушливые. В третьем периоде за счет увеличения количества осадков и несколько сниженных температур воздуха возможно существенное уменьшение дефицита влаги до 44 мм,

значительно улучшится влагообеспеченность (на 0.20 отн. ед.) и повысится ГТК до 1.24 отн. ед. (табл. 1).

Таким образом, при сравнении агрометеорологических условий, которые сложатся при климатических сценариях RCP4.5 и RCP8.5, следует отметить, что температурный режим и условия увлажнения (по показателю ГТК), будут лучшими в первый и второй сценарные периоды по климатическому сценарию RCP4.5. В третий сценарный период ожидается улучшение условий вегетации луговой растительности по климатическому сценарию RCP8.5 по сравнению со сценарием RCP4.5.

Изменение влаго-температурных показателей во время вегетации трав повлечет за собой изменение их фотосинтетической продуктивности. Так, по сценарию RCP4.5 ожидается, что наивысший уровень относительной площади листьев будет во второй период ( $3.04 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ ) за счет лучших условий влагообеспеченности и сниженного температурного режима (рис. 1).



**Рисунок 1.** Сравнение динамики площади листьев трав при средних многолетних условиях и в условиях изменения климата

*I – первый; II – второй; III – третий расчетные периоды по сценариям RCP4.5 и RSP8.5. Северная Степь*

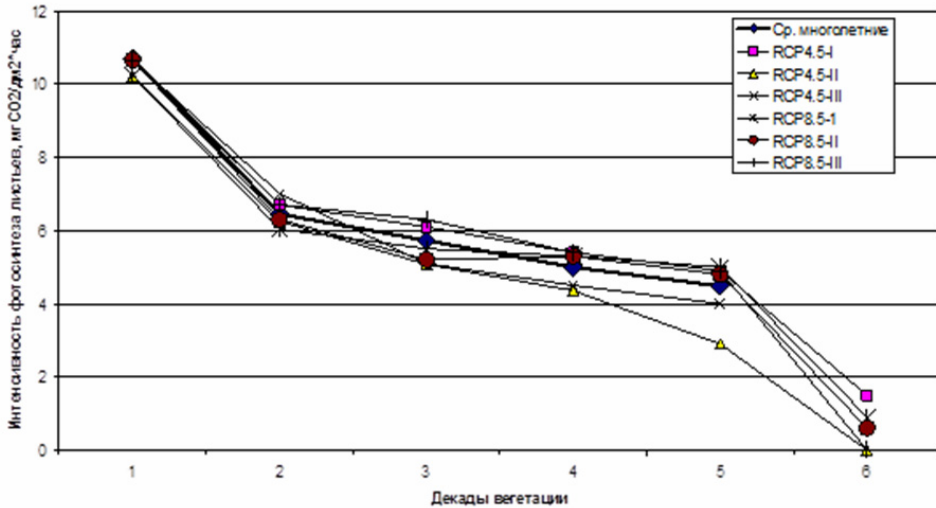
В достаточно засушливых условиях третьего периода сформируется меньшая площадь листового аппарата ( $1.83 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ ). По сценарию RCP8.5 формирование ассимиляционного аппарата будет идти аналогично динамике площади листьев при средних многолетних агрометеорологических условиях (рис. 1). Ожидается, что в период максимального развития ее величина составит: в первый период  $2.44 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ , во второй –  $2.28 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ , в третьей –  $3.07 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ .

Интенсивность фотосинтеза листьев трав по сценарию RCP4.5 при интенсивном нарастании ассимиляционной поверхности (вторая – четвертая декады вегетации) в первый и третий сценарные периоды будет достигать  $4.5\text{--}7.0 \text{ мг CO}_2 \text{ дм}^{-2} \text{ час}^{-1}$ , что близко к средним многолетним значениям. На фоне повышенных значений ФАР сформируется и высокий фотосинтетиче-



ский потенциал травостоя во все сценарные периоды. В первый-второй периоды он будет выше на 37-63% среднего многолетнего значения, в третий, относительно засушливый период, ожидается, что он будет на 11% выше среднего значения (рис. 2).

По климатическому сценарию RCP8.5 интенсивность фотосинтеза листьев трав будет несколько выше средней многолетней.



**Рисунок 2.** Средние динамики интенсивности фотосинтеза при средних многолетних условиях и в условиях изменения климата  
I, II, III - соответственно, первый, второй и третий расчетные периоды по сценариям изменения климата. Северная Степь

Во второй сценарный период интенсивность фотосинтеза листьев будет достигать 4.9–6.3 мг CO<sub>2</sub> дм<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup>, что несколько выше средних многолетних значений. Третий период будет наиболее благоприятным по температурному режиму и режиму увлажнения, что обусловит повышение интенсивность фотосинтеза на 0.1–0.6 мг CO<sub>2</sub> дм<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup> выше по сравнению с многолетним значением. При такой фотосинтетической деятельности фотосинтетический потенциал травостоя трав по обоим климатическим сценариями сформируется достаточно высокий (87.5–105.4 м<sup>2</sup> м<sup>-2</sup>). Следует отметить, что в первые два сценарных периода фотосинтетический потенциал ожидается выше по сценарию RCP4.5 чем по сценарию RCP8.5 Для первого и второго сценарных периодов предполагается его превышение на 20–27% многолетнего значения. Для третьего периода ожидается превышение этой величины на 44% от средней величины (табл. 2).

Уровень МВУ всей сухой массы трав по сценарию RCP4.5 в первом периоде ожидается выше на 39% от среднего многолетнего, который составляет 218 ц га<sup>-1</sup>, значительно большим он будет во втором периоде (на 46% выше среднего). Для третьего относительно засушливого периода уровень МВУ будет несколько ниже сравнительно с первым и вторым периодом и будет выше на 17% от среднего многолетнего значения.

При средних многолетних условиях урожай надземной массы трав при влажности 16% составляет  $3.5 \text{ т га}^{-1}$ . При агрометеорологических условиях первого периода он будет равен  $4.9 \text{ т га}^{-1}$ , что составит 140% от средней многолетней величины и ожидается сравнительно с первым периодом несколько более низким для третьего более засушливого периода (до 117%). В благоприятных по влагообеспеченности условиях второго периода он предполагается на уровне  $5.1 \text{ т га}^{-1}$  (146% от средних значений). Соотношение надземной части биомассы к подземной составляет около 0.25.

По климатическому сценарию RCP8.5 при небольшом повышении температуры воздуха (на  $1^\circ\text{C}$ ) и некотором недостатке осадков (на 6%) в первый и второй расчетные периоды уровень МВУ ожидается соответственно 265 и  $276 \text{ ц га}^{-1}$  всей сухой растительной массы, что немногим выше, чем уровень МВУ травостоя при средних многолетних условиях ( $218 \text{ ц га}^{-1}$ ). Это будет составлять 122–127% от среднего многолетнего значения. В третий период, который будет отмечаться благоприятным температурным режимом и режимом увлажнения, величина МВУ ожидается на уровне  $312 \text{ ц га}^{-1}$ , что на 43% выше средних значений.

Естественное плодородие почвы корректирует уровень ДВУ трав. По обоим сценариям ДВУ для первого и второго сценарных периодов ожидается  $183$  и  $190 \text{ ц га}^{-1}$  всей сухой растительной массы соответственно, что будет выше на 22–27% от среднего значения. Для третьего периода предполагается, что уровень ДВУ будет самым высоким и составит  $215 \text{ ц га}^{-1}$  (143% от среднемноголетнего).

Баланс содержания органического углерода в почве по обоим сценариям на участках луговой растительности ожидается положительным и составит для сценария RCP4.5 для двух первых сценарных периодов  $0.146\text{--}0.153 \text{ т С га}^{-1}$  за год, а для третьего периода –  $0.128\text{--}0.150 \text{ т С га}^{-1}$  за год, что соответственно будет выше на 17–46% от среднего многолетнего значения. По сценарию RCP8.5 он в первый и второй периоды будет ниже, чем по сценарию RCP4.5 (табл. 2).

Урожай надземной массы трав при влажности трав 16% составляет  $4.3 \text{ т га}^{-1}$  при среднемноголетних условиях. По сценарию RCP4.5 при агрометеорологических условиях первого и третьего сценарных периодов он ожидается на 8–15% выше среднего многолетнего значения. В более благоприятных по влагообеспеченности условиях второго периода он будет на уровне  $4.6 \text{ т га}^{-1}$ . Соотношение надземной части биомассы к подземной составит около 0.11.

По сценарию RCP8.5 урожай надземной массы трав для первого и второго периодов будет ниже от ожидаемого по сценарию RCP4.5 и составит  $4.2\text{--}4.5 \text{ т га}^{-1}$ . В условиях третьего сценарного периода предполагается, что урожай будет достигать  $5.0 \text{ т га}^{-1}$ , это на 43% выше среднемноголетнего. Соотношение надземной части биомассы к подземной ожидается на уровне 0.25.

**Южная Степь.** Сезонное развитие трав по средним многолетним данным начинается в середине третьей декады марта. По климатическому сценарию RCP4.5 в первый и второй сценарные периоды сезонное развитие трав ожидается на 1–2 дня раньше. В третьем периоде начало вегетации будет несколько

---

позже средних многолетних сроков (табл. 3). Во всех трех сценарных периодах предполагается увеличение поступления ФАР, на 2–6% больше оно будет в первые два периода, меньшим – в третьем периоде.

По сценарию изменения климата RCP8.5 сезонное развитие трав начнется в первый и третий сценарный период на 4–8 дней раньше многолетних сроков (табл. 3), во второй период начало вегетации совпадет с многолетними сроками.

**Таблица 3.** Агрометеорологические условия вегетации трав Южной Степи при средних многолетних условиях и в условиях изменения климата (за период начало вегетации – цветение)

Период, годы	Дата начала вегетации	Средняя температура воздуха, °С	Сумма осадков, мм	Суммарное испарение (E), мм	Испаряемость (E <sub>0</sub> ), мм	Относительная влагообеспеченность (E/E <sub>0</sub> ), отн.ед.	Средний ГТК, отн. ед.	Сумма ФАР, кДж см <sup>-2</sup>
1980-2010	24.03	12.2	83	96	191	0.50	0.87	60.5
RCP4.5								
2021-2030	22.03	12.0	61	76	181	0.42	0.64	75.0
2031-2040	23.03	11.6	82	91	162	0.56	0.83	74.8
2041-2050	29.03	13.3	68	84	164	0.51	0.77	63.9
RCP8.5								
2021-2030	16.03	11.9	98	106	162	0.65	0.89	70.5
2031-2040	24.03	11.9	97	105	164	0.64	0.97	70.0
2041-2050	20.03	12.5	98	106	166	0.64	0.94	67.4

Поступление ФАР по средним многолетним данным составляет 60.5 кДж см<sup>-2</sup> за период. По сценарию RCP4.5 во всех трех сценарных периодах ожидается значительное увеличение прихода ФАР; на 6–24% оно будет больше в первые два периода, меньшим – в третьем периоде (табл. 3). По сценарию RCP8.5 поступления ФАР будет больше, чем по средним многолетним данным на 11–16% (табл. 4).

При средних многолетних условиях ПУ всей сухой массы трав составит 385 ц га<sup>-1</sup>, в то время как по сценарию RCP4.5 в течение двух первых расчетных периодов она будет выше на 24–27% от средней многолетней величины, а для третьего периода, который будет отличаться меньшим поступлением ФАР, ПУ сухой массы увеличится только на 8% в сравнении с многолетней величиной (табл. 4).

Температура воздуха средняя за рассматриваемый период вегетации трав по многолетним данным составляет 12.2°С. По обоим сценариям в два первых сценарных периода она ожидается 11.6–12.0°С, что несколько ниже многолетней. В третий период предполагается, что она будет на 1.1°С выше многолетней по сценарию RCP4.5 и на 0.3°С выше средней величины по сценарию RCP8.5.

Таблица 4. Формирование урожая трав Южной Степи при средних многолетних условиях и в условиях изменения климата

Период, годы	Вся сухая масса, ц га <sup>-1</sup>			Фотосинтетический потенциал, м <sup>2</sup> м <sup>-2</sup>	Урожай трав при их влажности 16%, т га <sup>-1</sup>			Баланс органического углерода в почве, т С га <sup>-1</sup>
	потенциального урожая	метеорологически возможного урожая	действительно возможного урожая		надземной массы	подземной массы	общей массы	
1980-2010	385	160	104	49.0	1.3	11.5	12.8	0.077
RCP4.5								
2021-2030	490	194	134	59.7	1.5	14.0	15.5	0.093
2031-2040	476	202	139	62.0	1.6	14.5	16.1	0.097
2041-2050	419	180	125	56.0	1.4	13.0	14.4	0.087
RCP8.5								
2021-2030	470	218	150	66.1	1.8	15.7	17.5	0.105
2031-2040	460	200	138	61.0	1.6	14.4	16.0	0.096
2041-2050	472	208	144	53.6	1.7	15.0	16.7	0.100

В течение трех сценарных периодов увлажнение будет неравномерным. По климатическому сценарию RCP4.5 в первом и третьем периодах ожидается уменьшение суммы осадков за рассматриваемый период вегетации трав. В первый период количество осадков уменьшится почти на четверть, в третий период – на 18%. Увлажнение второго сценарного периода предполагается близким к климатической норме.

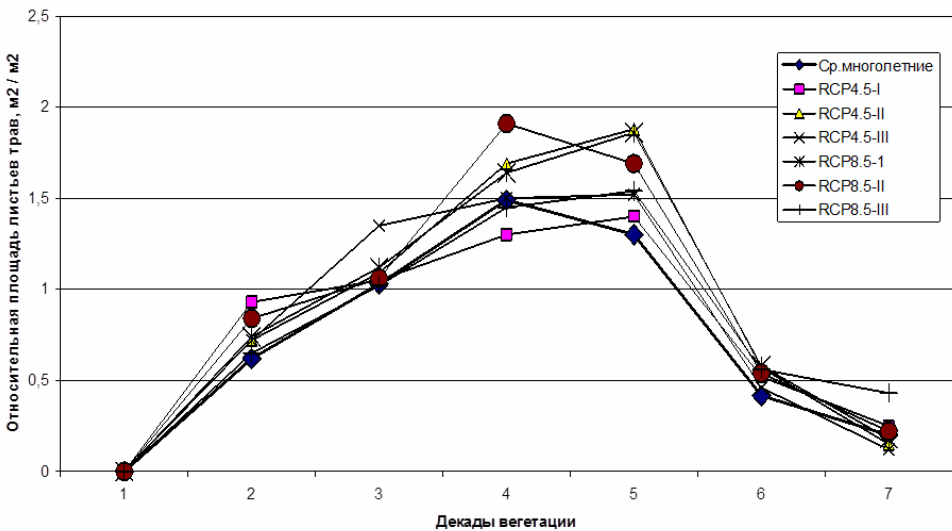
По сценарию RCP8.5 количество осадков будет ожидаться одинаковым во всех трех сценарных периодах и составит 97–98 мм, что будет выше климатической нормы на 17-18%. Это повлечет за собой уменьшение дефицита влаги ( $E_0 - E$ ) от 95 до 56-60 мм и улучшение влагообеспеченности от 0.50 до 0.64-0.65 отн. ед. (табл. 3).

Дефицит влаги по сценарию RCP4.5 в первый период вырастет от 95 до 105 мм, ухудшится влагообеспеченность трав от 0.50 до 0.42 отн. ед. Величина ГТК уменьшится от 0.87 до 0.64 отн. ед., она будет характеризовать этот период как засушливый. Во втором периоде, для которого вегетация трав будет проходить при сниженных на 0.6°C температурах воздуха и количестве осадков, близкого к многолетней величине, дефицит влаги уменьшится до 71 мм, улучшится влагообеспеченность (на 0.06 отн. ед.) и повысится ГТК до 0.83 отн. ед.

Третий сценарный период сравнительно со вторым периодом будет менее благоприятным для формирования урожая трав. Его характеризует более повышенная температура воздуха (на 1.4°C) и меньшее количество осадков. За этот период ГТК будет составлять 0.77 отн. ед. В этот период несколько вырастет дефицит влаги до 80 мм, соответственно уменьшится влагообеспеченность трав до 0.51 отн. ед. Последняя характеристика влагообеспеченности будет на уровне многолетней величины.

Сравнивая агрометеорологические условия, которые сложатся в случае реализации климатического сценария RCP4.5 и RCP8.5, следует отметить, что по температурному режиму и режиму увлажнения условия вегетации естественной растительности в Южной Степи по сценарию RCP8.5 ожидаются более благоприятные, чем при реализации сценария RCP4.5 (за исключением несколько сниженной температуры вегетации во второй сценарный период).

По сценарию RCP4.5 формирование ассимиляционного аппарата трав (рис. 3) будет идти аналогично динамике площади листьев при средних многолетних агрометеорологических условиях. При достаточно засушливых условиях первого периода сформируется меньшая площадь ассимиляционного аппарата ( $1.40 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ ). Второй сценарный период будет характеризоваться наиболее высоким уровнем относительной площади листьев ( $1.88 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ ) за счет лучших условий увлажнения и несколько сниженного температурного режима, а в условиях третьего периода площадь листьев составит  $1.52 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ . По сценарию RCP8.5 уровень площади листьев в период максимального развития будет более высоким по сравнению с многолетним значением.



**Рисунок 3.** Сравнение динамик площади листьев трав при средних многолетних условиях и условиях изменения климата

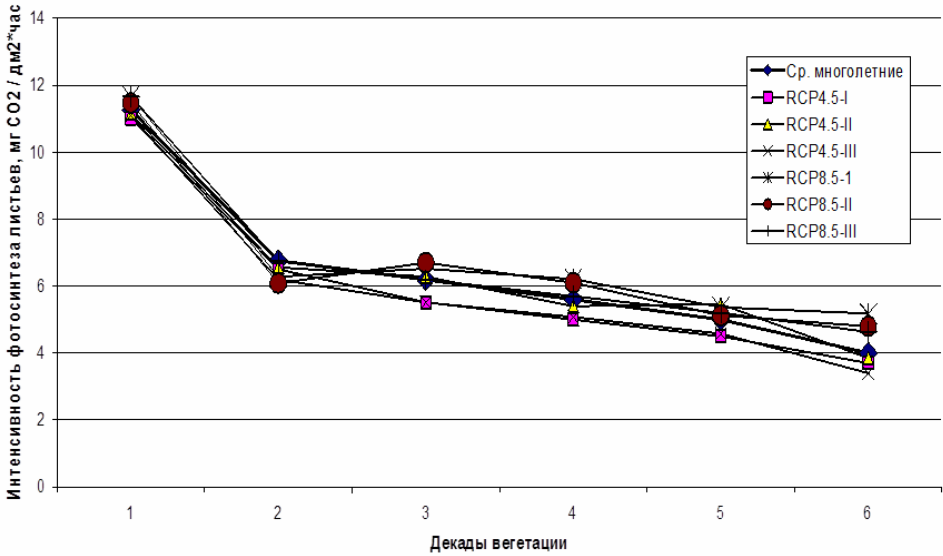
*I, II, III – соответственно, первый, второй и третий расчетные периоды по сценариям. Южная Степь*

Ожидается, что в третьем сценарном периоде он будет характеризоваться относительно меньшим уровнем площади листьев ( $1.54 \text{ м}^2 \text{ м}^{-2}$ ) вследствие несколько повышенного температурного режима.

В период интенсивного нарастания ассимиляционной поверхности (вторая – четвертая декады вегетации) интенсивность фотосинтеза листьев трав (рис. 4) по сценарию RCP4.5 в первый и третий сценарные периоды будет достигать  $5.0\text{--}6.6 \text{ мг CO}_2 \text{ дм}^{-2} \text{ час}^{-1}$ , что близко к уровню фотосинтеза при средних многолетних условиях.

Фотосинтетический потенциал травостоя в эти периоды ожидается на уровне  $114\text{--}126\%$  от среднемноголетних значений. В условиях сравнительно

высокой влагообеспеченности второго периода интенсивность фотосинтеза будет выше от многолетней величины, за счет чего сформируется более высокий уровень фотосинтетического потенциала травостоя сравнительно с первым и третьим периодами.



**Рисунок 4.** Средние динамики интенсивности фотосинтеза листьев трав при средних многолетних условиях и в условиях изменения климата

*I, II, III – соответственно, первый, второй и третий расчетные периоды по сценариям Южная Степь*

По сценарию RCP8.5 интенсивность фотосинтеза листьев трав (рис. 4) в первый и второй сценарные периоды будет достигать 5.1-6.2 мг СО<sub>2</sub> дм<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup>, т.е. находится практически на уровне фотосинтеза в средних многолетних условиях. Фотосинтетический потенциал травостоя соответственно сформируется в эти периоды (124-134% от значений среднего многолетнего). В условиях третьего периода сформируется несколько меньший уровень фотосинтетического потенциала травостоя сравнительно с первым и вторым периодами (109% от значений среднего многолетнего).

В случае реализации сценария RCP4.5 уровень МВУ всей сухой массы трав в первом периоде ожидается на 21% выше среднего многолетнего значения, большим он предполагается и во втором периоде (на 26% выше среднего). Для третьего периода уровень МВУ снизится до 180 ц га<sup>-1</sup>, он будет составлять 112% от значения среднего многолетнего, которое равняется 160 ц га<sup>-1</sup>. Уровень ДВУ всей сухой массы трав, обусловленный естественным плодородием почвы, оценивается в первом и третьем сценарных периодах на 20–28% выше среднего многолетнего. Для второго периода в более благоприятных агрометеорологических условиях уровень ДВУ достигнет 139 ц га<sup>-1</sup>, что составляет 134% от среднего многолетнего (табл. 4).

Урожай надземной массы трав при их влажности 16% составляет 1.3 т га<sup>-1</sup> (табл. 4) при средних многолетних условиях. При ожидаемых агрометеорологических условиях первого и третьего сценарных периодов (сценарий

RCP4.5) он будет равен 108–115% от среднего многолетнего. В более благоприятных по влагообеспеченности условиях второго периода он будет на уровне  $1.6 \text{ т га}^{-1}$ . Соотношение надземной части биомассы к подземной будет равно около 0.11.

По сценарию RCP8.5 в первом периоде величина МВУ всей сухой массы трав ожидается на уровне 136% от среднего многолетнего, несколько меньшим урожай будет во втором и третьем периодах (125–130% от среднего). Уровень ДВУ всей сухой массы трав, обусловленный естественным плодородием почвы, предполагается в первом периоде 144% от среднего многолетнего. Для второго и третьего периодов уровень ДВУ будет равен 138–144 ц  $\text{га}^{-1}$ , что составит 133–138% от среднего многолетнего (табл. 4).

При средних многолетних условиях урожай надземной массы трав при влажности 16% равен  $1.3 \text{ т га}^{-1}$  (табл. 4). Для будущих условий первого сценарного периода он ожидается на уровне 138% от многолетнего, для второго и третьего сценарных периодов он будет составлять 123–131% от многолетнего значения и находиться на уровне  $1.3 \text{ т га}^{-1}$ . Соотношение надземной части биомассы к подземной будет равно около 0.11.

Сравнение ожидаемого урожая надземной массы трав в Южной Степи по обоим климатическими сценариями показывает, что за исключением второго сценарного периода более благоприятные условия формирования урожая по климатическому сценарию RCP8.5 позволят ожидать и высший уровень урожайности трав, чем при реализации сценария RCP4.5.

По обоим сценариям баланс органического углерода в почве на участках степной растительности ожидается положительным и составит для первого и третьего сценарных периодов  $0.087\text{--}0.105 \text{ т С га}^{-1}$  за год, для второго периода  $0.096\text{--}0.097 \text{ т С га}^{-1}$  за год, что соответственно будет выше на 13–36 и 25–26% от среднего многолетнего значения.

### Обсуждение результатов и заключение

Результаты нашего исследования продуктивности трав хорошо совпадают с разработками (Базилевич, 1993) относительно результатов средних многолетних величин продуктивности луговой и степной растительности, в которых для сравнения приводятся данные, которые относятся к степной зоне Украины.

Экспериментальные измерения баланса углерода в почве, проведенные в различных почвенно-климатических условиях, позволяют сопоставить полученные нами результаты моделирования с результатами других авторов. В условиях Европы предполагается (Yidini, Panados, 2016) значимое увеличение содержания органического углерода в почве к 2050 году. Полученные нами данные согласуются приведенными в работе (Mueller et al., 2007) данными, характеризующими изменение содержания органического углерода в почве в Европе до 2100 года. Ожидается в связи с изменением климата по различным сценариям изменения климата увеличение баланса органического углерода в почве от 3 до 13%, а по данным (Ito, 2005) увеличение составит от 23 до 33%.

В условиях Средиземноморья (Escolano et al., 2018) отмечается уменьшение содержания органического углерода в почве в условиях изменения климата. В работе (Vleeshouwers, Verhagen, 2002) указывается, что в условиях Европы баланс органического углерода в почве на пахотных землях колеблется от  $0.15 \text{ т С га}^{-1}$  за год на участке с учетом внесения соломы и до  $1.5 \text{ т С га}^{-1}$  за год при внесении органических удобрений. В условиях Западной Германии (Steinmann et al., 2016) положительный баланс углерода в почве достигал от значений около  $20 \text{ кг С га}^{-1}$  за год (2003–2005 гг.) до  $133 \text{ кг С га}^{-1}$  за год (2005–2013 гг.) при внесении органических удобрений. Вместе с тем, как показали исследования на 92 участках пахотных угодий в Юго-Западной Баварии (Poyda et al., 2019) интенсивное выращивание сельскохозяйственных культур в период между 1986 и 2007 годами привело к снижению содержания органического углерода в почве даже если внесение органических удобрений сохранялось на прежнем уровне или даже уменьшалось. Мониторинг органического углерода в почве в условиях Швеции в течении 25 лет (Gubler et al., 2019) показал, что содержание органического углерода в почве колебалось от  $-11$  до  $+16\%$  за десятилетие на ансамбле наблюдаемых участков.

Выполненные на черноземах Левобережной части Украины (Сябрук, 2013) многолетние измерения баланса углерода и эмиссии  $\text{CO}_2$  из черноземной почвы под однолетними укосными травами демонстрируют средние значения баланса углерода, равные  $-0.10 - -0.13 \text{ т С га}^{-1}$  за год.

В условиях изменения климата при реализации сценариев в разные периоды по десятилетиям будут происходить неоднозначные изменения условий формирования продуктивности луговой и степной растительности. Изменение влажно-температурных условий повлечет незначительное увеличение площади поверхности листьев, которое в свою очередь будет способствовать увеличению биомассы растений. Почти во все три периода по расчетам ожидается рост агроэкологических категорий урожайности трав.

В целом за некоторым исключением (третий сценарный период) агрометеорологические условия формирования урожая, которые ожидаются за климатическими сценариями, будут складываться лучшими в Северной Степи по сценарию RCP4.5, а в Южной Степи по сценарию RCP8.5. В сравнении по обоим сценариям агрометеорологические условия формирования продуктивности трав ожидаются лучшими в Северной Степи, а уровень урожайности луговой растительности будет втрое выше по сравнению с урожайностью в Южной Степи.

Баланс содержания углерода в почве также несколько увеличится и будет составлять в Северной Степи  $0.123-0.153 \text{ т С га}^{-1}$  за год, а в Южной Степи –  $0.087-0.105 \text{ т С га}^{-1}$  за год. Произойдет также и изменение соотношения надземной и подземной части растений.

Приведенные выше результаты оценки влияния возможных изменений климата (по климатическими сценариями RCP4.5 и RCP8.5) на формирование продуктивности луговой и степной растительности, баланс органического углерода в почве под природной растительностью получены впервые.

---



## Список литературы

Базилевич Н.И. 1993. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М., Наука, 293 с.

Білик Г.І., Ткаченко В.С. и др. 1972. Современное состояние растительного покрова заповедника «Михайловская целина» на Сумщине. – Украинский ботанический журнал, № 29 (6), с. 696-702.

Кондратюк Е.Н., Чуприна Т.Т. 1992. Ковыльные степи Донбасса. Современное состояние и перспективы восстановления. – Киев, Наукова думка, 171 с.

Конопля М.І. Конопля О.М., Душинова Л.В. 2001. Сучасний стан та проблеми охорони степової рослинності Сходу України. – Зб. наук. праць (Фальцфейнівські читання). – Херсон, с. 75-77.

Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України 2015. /За ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. – Одеса, ТЕС, 520 с.

Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах змін клімату. 2018. /За ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. – Одеса, ТЕС, 546 с.

Образцов А.С. 1990. Системный метод: применение в земледелии. – М., Агропромиздат, 303 с.

Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України 2011. /За ред. С.М. Степаненко, А.М. Польового. – Одеса, Екологія, 694 с.

Парахин Н.В., Кобозев И.В., Горбачев И.В и др. 2006. Кормопроизводство. – М., Колос, 432 с.

Полевой А.Н. 2004. Базовая модель оценки агроклиматических ресурсов формирования продуктивности сельскохозяйственных культур. – Метеорология, климатология и гидрология, вып. 48, с. 195-205.

Проблемы ландшафтного многообразия Украины. 2000. Сборник научных трудов. – Киев, Карбон Лтд, 325 с.

Романова Э.П. 1997. Современные ландшафты Европы. – М., Изд. МГУ, 302 с.

Сябрук О.П. 2013. Оцінка втрат вуглецю з чорнозему типового за різних способів обробітку та систем удобрення. – Агрохімія і ґрунтознавство, вип. 80, с. 140-146.

Танфильев В.Г. 1975. О долголетию злаковых, бобовых и некоторых вторых трав. – Труды Ставропольского НИИСХ, вып. 17, с. 99-105.

Титлянова А.А., Афанастев Н.А., Наумова Н.Б. и др. 1993. Сукцессии и биологический круговорот. – Новосибирск, ВО, Наука, Сиб. изд. фирма, 157 с.

Тооминг Х.Г. 1984. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. – Л., Гидрометеиздат, 264 с.

Чибилев А.А. 1990. Лик степи. Экологогеографические очерки о степной зоне СССР. – Л., Гидрометеиздат, 192 с.

Шищенко П.Г. 1985. Антропогенные преобразования современных ландшафтов. – В сб.: Природная среда и хозяйственная деятельность человека. – Киев, Изд. Киев.ун-та, с. 114-131.

Шищенко П.Г. 2000. Глобализация и деверсификация функций современных ландшафтных систем в контексте многообразия. – В сб.: Проблемы ландшафтного многообразия Украины. – Киев, с. 17-20.

Aiming Q., Robert A., Taylor G., Goetz M.R. 2018. Grassland futures in Great Britain – Productivity assessment and scenarios for land use change opportunities. – *Science of the Total Environment*, vol. 634, pp. 1108–1118.

Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. 2008. – Springer, 472 p.

Burri S., Sturm P., Prechs U.E., A. Knoh A., and N. Buchmann. 2014. The impact of extreme summer drought on the short-term carbon coupling of photosynthesis to soil CO<sub>2</sub> efflux in a temperate grassland. – *Biogeosciences*, vol. 11(7), pp. 961-975.

Chang J., Ciais P., Viovy N., Soussana J.-F., Klumpp K. and B. Sultan. 2017. Future productivity and phenology changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance. – *Carbon Balance and Management*, vol. 12(11), pp. 27-89.

Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.-F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. – *Nature*, vol. 437(7058), pp. 529-533.

Escolano J.J.J., Pedreño N.I., Lucas G.M., Candel B.A., Zorpas A.A. 2018. Chapter 1. Decreased Organic Carbon Associated With Land Management in Mediterranean Environments. – *Soil Management and Climate Change*. Academic Press, pp. 1-13.

Fuchslueger L., Bahn M., Hasibeder R., Kienzl S., Fritz K., Schmitt M., Watzka M., Richter A. 2016. Drought history affects grassland plant and microbial carbon turnover during and after a subsequent drought event. – *Journal of Ecology*, pp. 1-13.

Gilgen A.K., Buchmann N. 2009. Response of temperate grasslands at different altitudes to simulated summer drought differed but scaled with annual precipitation. – *Biogeosciences*, vol. 6, pp. 2525-2539.

Gubler A., Wächter D., Schwab P., Müller M, Keller A. 2019. Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends. – *Environmental Monitoring and Assessment*, No. 5, pp. 191-277.

---

Holden N.M. and Brereton A.J. 2002. An Assessment of the Potential Impact of Climate Change on Grass Yield in Ireland over the Next 100 Years. – *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, vol. 41, No. 2, pp. 213-226.

Hopkins A., Del Prado A. 2007. Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review. *Grass and Forage Science*. – *The Journal of the British Grassland Society and the Official Journal of the European Grassland Federation*, vol. 62, issue 2, pp. 118-126.

Ito A. 2005. Climate-related uncertainties in projections of the twenty-first century terrestrial carbon budget Off-line model experiments using IPCC greenhouse-gas scenarios and AOGCM climate projections. – *Climate Dynamics*, vol. 24(5), pp. 435-448.

Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M., et al. 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. – *Reg Environ Change*, vol. 14(2), pp.563–578.

Johansson J., Bolmgren K., Jonzén N. 2013. Climate change and the optimal flowering time of annual plants in seasonal environments. – *Global Change Biology*, vol. 19, issue 1, pp. 197-207.

Leitinger G., Ruggenthaler R., Hammerle A., Lavorel S., Schirpke U., Clement J.C., Lamarque P., Obojes N., Tappeiner U. 2015. Impact of droughts on water provision in managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. – *Ecohydrology*, vol. 8, issue 8, pp. 1600-1613.

Mueller C., Eickhout B., Zaehle S., Bondeau A., Cramer W. Lucht W. 2007. Effects of changes in CO<sub>2</sub>, climate, and land use on the carbon balance of the land biosphere during the 21st century. – *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*, vol. 112, pp. 20-32.

Poyda A.,Wizemann H.-D., Ingwersen J., Eshonkulov R., Högy P., Demyan M., Kremer., Wulfmeyer V., Streck T. 2019. Carbon fluxes and budgets of intensive crop rotations in two regional climates of southwest Germany. – *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 276, pp. 31-46.

Reyer C.P.O., Leuzinger S., Rammig A., Wolf A., Bartholomeus R.P., Bonfante A., de Lorenzi F. 2013. A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. – *Global Change Biology*, vol. 19, issue 1, pp. 1-336.

Richardson A.D., Keenan T.F., Migliavacca M., Ryu Y., Sonnentag O., Toomey M. 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 169, pp. 156-173.

Romkin V., Savchenko G. 2016. Flora and vegetation of dry grassland of Northeastern Ukraine, and problems of diversity conserlation. – *Hacquetia*, vol. 15(2), pp. 49-62.

Steinmann T., Welp G., Wolf A., Holbeck B., Rüschkamp T.G., Amelung W. 2016. – Repeated monitoring of organic carbon stocks after eight years reveals carbon losses from intensively managed agricultural soils in Western Germany, vol. 179, issue 3, pp. 355-366.

Van Oijen M., Balkovi J., Beer C., Cameron D.R., Ciais P., Cramer W., et al. 2014. Impact of droughts on the carbon cycle in European vegetation: a probabilistic risk analysis using six vegetation models. – Biogeosciences, vol. 11(22), pp. 6357–6375.

Vleeshouwers L.M., Verhagen A. 2002. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. – Global Change Biology, vol. 8, pp. 519–530.

Yidini Y., Panados P. 2016. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. – Science of The Total Environment, vol. 557–558, issue 1, pp. 838-850.

*Статья поступила в редакцию: 29.06.2019 г.*

---

# FORMATION OF PRODUCTIVITY OF MEADOW AND STEPPE VEGETATION UNDER CLIMATE CHANGE

A.N. Polevoy\*, L.E. Bozhko, E.A. Barsukova

Odessa State Environmental University,  
15 Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine; \*apolevoy@te.net.ua

**Abstract.** The paper presents the characteristic of agro-climatic conditions of meadow and steppe vegetation productivity formation under climate change for the period up to 2050. The assessment was realized by comparing the average long-term agro-climatic indicators (1980-2010) of the productivity of natural phytocenoses in the Steppe zone of Ukraine with the same indicators for the future decades for three time periods: 2021-2030, 2031-2040 and 2041-2050. Calculations of climate change were performed by using scenarios RCP4. 5 and RCP8.5 for three agroecological yield categories: potential, meteorologically possible and really possible. Climate change will lead to an increase in grass productivity. It will be higher in the Northern Steppe (by 17-46% compared to the average long - term values) and lower in the Southern Steppe (by 8-38%). In addition, a change in the organic carbon balance in soil will happen. Under both reviewing scenarios, the balance of organic carbon in the areas of meadow and steppe vegetation is expected to be positive.

**Keywords.** Climate change, meadow vegetation, steppe vegetation, productivity, photosynthesis, leaf area, photosynthetic potential, crop, soil, organic carbon.

## References

Bazilevich N.I. 1993. *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoy Evrazii*. [Biological productivity of ecosystems of Northern Eurasia]. Moscow, 293 p.

Bilyk H.I., Tkachenko V.S. et al. 1972. Suchasnyi stan roslynnoho pokryvu zapovidnyka «Mykhailivska tsilyna» na Sumshchyni [The current state of the vegetation of the "Mikhailivska Tselina" reserve in Sumy region]. *Ukrainskyi botanichnyi zhurnal – Ukrainian botanic journal*, no. 29(6), pp. 696-702.

Kondratyuk E.N., Chuprina T.T. 1992. *Kovyl'nye stepi Donbassa. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy vosstanovleniya*. [Feather grass steppes of Donbass. The current state and prospects for recovery]. Kiev, 171 p.

Konoplya M.I. Konoplya O.M., Dushinova L.V. 2001. *Suchasnij stan ta problemi ohoroni stepovoy roslinnosti Skhodu Ukrainy* [Current state and problems of protection of steppe vegetation of the East of Ukraine]. – *Zbirnik naukovih prac' (Fal'cfejnivs'ki chitannya)* – Collection of scientific works (Fal'spnev reading). Kherson, pp. 75-77.

Stepanenko S.M. ta Polovyi A.M. 2015. *Klimatychni zminy ta yikh vplyv na sfery ekonomiky Ukrainy* [Climatic changes and their influence on the spheres of economy of Ukraine]. Odessa, 520 p.

---

Stepanenko S.M. ta Polovyi A.M. 2018. *Klimatychni ryzyky funkcionuvannya galuzej ekonomiky Ukrainy v umovax zmini klimatu* [Climatic risks of functioning of Ukrainian economy sectors in conditions of climate change]. Odessa, 546 p.

Stepanenko S.M. ta Polovyi A.M. 2011. *Otsinka vplyvu klimatychnykh zmin na haluzi ekonomiky Ukrainy* [Assessment of the impact of climate change on the economy of Ukraine]. Odessa, 694 p.

Parakhin N.V., Kobozev I.V., Gorbachev I.V. et al. 2006. *Kormoproizvodstvo* [Feed production]. Moscow, 432 p.

Polovyi A.M. 2004. Bazovaja model' ocenki agroklimaticheskikh resursov formirovanija produktivnosti sel'skohozijskikh kul'tur. [The basic model for assessing agroclimatic resources for the formation of agricultural crop productivity]. *Meteorologiya, klimatologiya ta gidrologiya – Meteorology, climatology and hydrology*, vol. 48, pp. 195 – 205.

*Problemy landshaftnoho riznomanittia Ukrainy* [Problems of Landscape Diversity in Ukraine] 2000. Collection of scientific works. Kyiv, 325 p.

Romanova E.P. 1997. *Sovremennye landshafty Evropy*. [Modern landscapes of Europe]. Moscow, 302 p.

Syabruk O.P. 2013. Ocinka vtrat vuglecyu z chornozemu tipovogo za riznih sposobiv obrobittu ta sistem udobrennya [Estimation of carbon losses from chernozem typical of different methods of cultivation and fertilizer systems]. *Agrohimiya i truntoznavstvo – Agrochemistry and soil science*, vol. 80, pp. 140-146.

Tanfil'ev V.G. 1975. O dolgoletii zlakovykh, bobovykh i nekotorykh drugikh trav [On the longevity of cereals, legumes and some other herbs]. *Trudy Stavropolskogo NIISKh – Works of the Stavropol SRIA*, vol. 17, pp. 99-105.

Titlyanova A.A., Afanastev N.A., Naumova N.B. et al. 1993. *Suksessii i biologicheskii krugovorot* [Succession and biological circulation]. Novosibirsk, 157 p.

Tooming H.G. 1984. *Ekologicheskie principy maksimal'noj produktivnosti posevov* [Ecological principles of maximum productivity of crops]. Leningrad, 264 p.

Chibilev A.A. 1990. *Lik stepi. Ekologogeograficheskie ocherki o stepnoy zone SSSR* [Face of the steppe. Environmental geographic essays on the steppe zone of the USSR]. Leningrad, 192 p.

Shishchenko P.G. 1985. *Antropogennyie preobrazovaniya sovremennykh landshaftov*. [Anthropogenic transformations of modern landscapes]. *V sbornike prirodnyaya sreda i hozyajstvennaya deyatel'nost' cheloveka* [In the collection of the natural environment and human activities]. Kiev, pp. 114-131.

Shyshchenko P.H. 2000. *Hlobalizatsiia ta deversifikatsiia funktsii suchasnykh landshaftnykh system v konteksti riznomanittia*. [Globalization and diversification of the functions of modern landscape systems in the context of diversity]. *V sbornike problemy landshaftnoho riznomanittia Ukrainy* [In the collection of problems of Ukraine's Landscape Diversity]. Kiev, pp 17-20.

---

Aiming Q., Robert A., Taylor G., Goetz M. R. 2018. Grassland futures in Great Britain – Productivity assessment and scenarios for land use change opportunities. – *Science of the Total Environment*, vol. 634, pp. 1108–1118.

Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. 2008. – Springer, 472 p.

Burri S., Sturm P., Prechs U.E., A. Knoh A., and N. Buchmann. 2014. The impact of extreme summer drought on the short-term carbon coupling of photosynthesis to soil CO<sub>2</sub> efflux in a temperate grassland. – *Biogeosciences*, vol. 11(7), pp. 961-975.

Chang J., Ciais P., Viovy N., Soussana J.-F., Klumpp K. and B. Sultan. 2017. Future productivity and phenology changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance. – *Carbon Balance and Management*, vol. 12(11), pp. 27-89.

Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.-F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R. 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. – *Nature*, vol. 437(7058), pp. 529-533.

Escolano J.J.J., Pedreño N.I., Lucas G.M., Candel B.A., Zorpas A.A. 2018. Chapter 1. Decreased Organic Carbon Associated With Land Management in Mediterranean Environments. – *Soil Management and Climate Change*. Academic Press, pp. 1-13.

Fuchslueger L., Bahn M., Hasibeder R., Kienzl S., Fritz K., Schmitt M., Watzka M. and A. Richter. 2016. Drought history affects grassland plant and microbial carbon turnover during and after a subsequent drought event. – *Journal of Ecology*, pp. 1-13.

Gilgen A.K., Buchmann N. 2009. Response of temperate grasslands at different altitudes to simulated summer drought differed but scaled with annual precipitation. – *Biogeosciences*, vol. 6, pp. 2525-2539.

Gubler A., Wächter D., Schwab P., Müller M, Keller A.. 2019. Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends. – *Environmental Monitoring and Assessment*, No. 5, pp. 191-277. Holden N.M. and A.J. Brereton. 2002. An Assessment of the Potential Impact of Climate Change on Grass Yield in Ireland over the Next 100 Years. – *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, vol. 41, No. 2, pp. 213-226.

Hopkins A., Del Prado A. 2007. Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review. *Grass and Forage Science*. – *The Journal of the British Grassland Society and the Official Journal of the European Grassland Federation*, vol. 62, issue 2, pp. 118-126.

Ito A. 2005. Climate-related uncertainties in projections of the twenty-first century terrestrial carbon budget Off-line model experiments using IPCC greenhouse-gas scenarios and AOGCM climate projections. – *Climate Dynamics*, vol. 24(5), pp. 435-448.

Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M., et al. 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. – *Reg Environ Change*, vol. 14(2), pp.563–578.

Johansson J., Bolmgren K., Jonzén N. 2013. Climate change and the optimal flowering time of annual plants in seasonal environments. – *Global Change Biology*, vol. 19, issue 1, pp. 197-207.

Leitinger G., Ruggenthaler R., Hammerle A., Lavorel S., Schirpke U., Clement J.C., Lamarque P., Obojes N., Tappeiner U. 2015. Impact of droughts on water provision in managed alpine grasslands in two climatically different regions of the Alps. – *Ecohydrology*, vol. 8, issue 8, pp. 1600-1613.

Mueller C., Eickhout B., Zaehle S., Bondeau A., Cramer W. Lucht W. 2007. Effects of changes in CO<sub>2</sub>, climate, and land use on the carbon balance of the land biosphere during the 21st century. – *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*, vol. 112, pp. 20-32.

Poyda A.,Wizemann H.-D., Ingwersen J., Eshonkulov R., Högy P., Demyan M., Kremer., Wulfmeyer V., Streck T. 2019. Carbon fluxes and budgets of intensive crop rotations in two regional climates of southwest Germany. – *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 276, pp. 31-46.

Reyes C.P.O., Leuzinger S., Rammig A., Wolf A., Bartholomeus R.P., Bonfante A., de Lorenzi F. 2013. A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. – *Global Change Biology*, vol. 19, issue 1, pp. 1-336.

Richardson A.D., Keenan T.F., Migliavacca M., Ryu Y., Sonnentag O., Toomey M. 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. – *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 169, pp. 156-173.

Romkin V., Savchenko G. 2016. Flora and vegetation of dry grassland of Northeastern Ukraine, and problems of diversity conserlation. – *Hacquetia*, vol. 15(2), pp. 49-62.

Steinmann T., Welp G, Wolf A., Holbeck B., Rüschkamp T.G., Amelung W. 2016. – Repeated monitoring of organic carbon stocks after eight years reveals carbon losses from intensively managed agricultural soils in Western Germany, vol. 179, issue 3, pp. 355-366.

Van Oijen M., Balkovi J., Beer C., Cameron D.R., Ciais P., Cramer W., et al. 2014. Impact of droughts on the carbon cycle in European vegetation: a probabilistic risk analysis using six vegetation models. – *Biogeosciences*, vol. 11(22), pp. 6357–6375.

---



Vleeshouwers L.M., Verhagen A. 2002. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. – *Global Change Biology*, vol. 8, pp. 519–530.

Yidini Y., Panados P. 2016. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe. – *Science of The Total Environment*, vol. 557–558, issue 1, pp. 838-850.